



**António Manuel Vieira Pombo**

Mestre em Engenharia Eletrotécnica e Computadores  
Mestre em Gestão Global

## **Otimização Multiobjectivo Para o Aumento da Fiabilidade em Redes de Distribuição Radiais com Incorporação de Geração Distribuída e Sistemas de Armazenamento**

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em  
Engenharia Eletrotécnica e Computadores

Orientador: Prof. Doutor Victor Manuel Fernão Pires  
Professor Coordenador  
Escola Superior de Tecnologia de Setúbal  
Instituto Politécnico de Setúbal

Coorientador: Prof. Doutor João Miguel Murta Pina  
Professor Auxiliar  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade Nova Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Paulo da Costa Luís da Fonseca Pinto  
Arguentes: Prof. Doutor Humberto Manuel Matos Jorge  
Prof. Doutor João José Esteves Santana

Vogais: Prof. Doutor Victor Manuel Fernão Pires  
Prof. Doutor João Francisco Alves Martins



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

[Setembro de 2015]



**Otimização Multiobjectivo Para o Aumento da Fiabilidade em Redes de Distribuição Radiais com Incorporação da Geração Distribuída e Sistemas de Armazenamento.**

Copyright © António Manuel Vieira Pombo, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Dedicatória

Aos meus quatro filhos, presentes singulares que a ternura de Deus me deu.

À minha esposa pelo amor, paciência e por tão bem compreender os meus momentos de ausência em função deste trabalho.

Aos meus pais e irmão, pelo apoio irrestrito em todos os momentos da minha vida.



# Agradecimentos

A realização de um vasto trabalho deste tipo significa antes de mais, um conjugar de esforços e de boa vontade de um vasto conjunto de pessoas, a quem quero justamente agradecer.

A Deus, o Criador do Universo por na devida altura, ter proporcionado todas as condições que tornaram possível este trabalho.

Ao meu amigo e orientador Professor Victor Fernão Pires, pela orientação segura e precisa, pela enorme paciência e especialmente pelo grande apoio e amizade ao longo de todas as etapas deste trabalho.

Ao meu coorientador Professor João Murta Pina, pelas sugestões e discussões ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor João Martins, pela generosidade e incentivo manifestado desde o início deste caminho.

À Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Instituto Politécnico de Setúbal e CTS/UNINOVA pela disponibilização dos meios que permitiram a realização deste trabalho.

A todos os que no seu anonimato aqui não foram referidos, mas que não deixaram de ser importantes para a concretização deste trabalho, quero expressar o meu sincero agradecimento.





# Resumo

---

O planeamento das redes de distribuição de energia elétrica é considerado de extrema importância para o desenvolvimento de infraestruturas de elevada fiabilidade. A este nível, as empresas elétricas estão a ser confrontadas com objetivos contraditórios de clientes que requerem maior qualidade de serviço e dos que querem preços de energia mais baixos. Para competir neste contexto, é importante que as empresas elétricas estabeleçam um balanço entre os custos de investimento em equipamentos para aumentar a fiabilidade e o nível de fiabilidade alcançado com esse investimento.

Este trabalho propõe resolver este problema de planeamento considerando a sua natureza multiobjectivo. Assim, foram desenvolvidos modelos matemáticos para a integração das diversas variáveis minimizadas associadas à fiabilidade, deste problema de otimização multiobjectivo. Nas últimas décadas, a crescente penetração da geração distribuída (GD) tem representado uma série de desafios técnicos para as redes de distribuição que foram concebidas de uma forma tradicional. Assim, propuseram-se modelos para a integração da GD no problema da fiabilidade deste tipo de redes. Neste contexto, também foi proposta uma abordagem para a análise da fiabilidade sob o ponto de vista da redução de gases de efeito de estufa. Neste momento, o problema da fiabilidade começa também a ser abordado quanto às interrupções momentâneas. Assim, considerou-se adicionalmente uma abordagem em que se consideram os sistemas de armazenamento de energia. Para a otimização das várias abordagens desenvolveram-se algoritmos de otimização do tipo evolutivo.

Para testar as abordagens e modelos propostos, obtiveram-se resultados a partir de testes realizados sobre uma rede de distribuição real.

**Palavras-chave:** Redes de distribuição, Fiabilidade, SAIDI, SAIFI, MAIFI, Geração Distribuída (GD), Sistemas de Armazenamento de Energia.

---



# Abstract

---

Planning of electricity distribution networks is considered extremely important for the development of highly reliable infrastructures. At this level, power companies are being confronted with contradictory goals of customers requiring higher quality of service and those who want to lower energy prices. To compete in this context, it is important for the electric companies to establish a balance between investment costs in equipment to increase the reliability and the level of reliability achieved with this investment.

This paper proposes solving this planning problem considering its multi-objective nature. Therefore, mathematical models were developed in order to integrate the several variables that were minimized associated to the reliability of this multi-objective optimization problem. In recent decades, the increasing penetration of distributed generation (DG) has represented a number of technical challenges to distribution networks that are designed in a traditional way. Thus, models were proposed for integration of GD in the reliability problem of this type of networks. In this context, it has also been proposed an approach to the analysis of the reliability from the point of view of the reduction of greenhouse gases emissions. At this time, the problem of reliability is also addressed considering momentary interruptions. Therefore, it was additionally considered an approach in which energy storage systems were considered. For the optimization of the various approaches proposed, several evolutionary type optimization algorithms were developed. To test the proposed approaches and models, results were obtained from tests realized over a real distribution network.

**Key Words:** Distribution Networks, Reliability, SAIDI, SAIFI, MAIFI, Distributed Generation (DG), Energy Storage Systems

---



# Conteúdo

Dedicatória	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Conteúdo	xi
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Lista de Siglas	xxi
<b>Capítulo 1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Preâmbulo .....	1
1.2 Enquadramento e Motivação .....	3
1.2.1 Questões de Investigação .....	4
1.2.2 Hipótese .....	5
1.2.3 Abordagem para o teste da hipótese.....	5
1.3 Objetivos do Trabalho e Metodologias .....	6
1.4 Estrutura da Dissertação.....	8
<b>Capítulo 2 Fiabilidade em Redes de Distribuição Radiais.....</b>	<b>11</b>
2.1 Introdução .....	11
2.2 Avaliação de Fiabilidade.....	12
2.3 Fiabilidade e Definições Associadas.....	14
2.4 Índices de Fiabilidade em Redes de Distribuição .....	15
2.4.1 Índices de Fiabilidade Baseados no Clientes .....	17
2.4.2 Índices de Fiabilidade Baseados na Carga.....	20
2.4.3 Índices de Fiabilidade Baseados na Energia.....	21

2.5 Riscos Associados aos Índices mais Utilizados .....	22
2.6 Fiabilidade em Redes de Distribuição Radiais com Dispositivos de Interrupção .....	24
2.7 Fiabilidade em Redes de Distribuição Radiais Integrando Geração Distribuída .....	29
2.8 Fiabilidade em Redes de Distribuição Radiais considerando Índices de Fiabilidade para Interrupções de Curta Duração .....	37
2.9 Conclusões .....	41

### **Capítulo 3 Planeamento Multiobjectivo em Redes Distribuição Radiais integrando Dispositivos de Interrupção ..... 43**

3.1 Introdução .....	43
3.2 Fiabilidade em Redes de Distribuição Radiais com Integração de Dispositivos de Interrupção .....	44
3.3 Formulação do Problema .....	47
3.3.1 Função Objetivo - SAIDI .....	48
3.3.2 Função Objetivo - SAIFI .....	49
3.3.3 Função Objetivo – CE (Custo Equipamento) .....	49
3.4 Algoritmos para a Otimização Multiobjectivo .....	50
3.4.1 Otimização Multiobjectivo .....	51
3.4.2 Algoritmos Evolucionários Multiobjectivo .....	53
3.4.3 Medidas de Desempenho.....	55
3.5 O Algoritmo Genético Evolutivo NSGA-II (Fast Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) .....	56
3.5.1 População .....	59
3.5.2 Ordenação e Aptidão.....	60
3.5.3 Distância à Multidão .....	61
3.5.4 Seleção .....	62
3.5.5 Operadores genéticos .....	63
3.5.6 Seleção da Nova População.....	64
3.6 O Algoritmo Memético Evolutivo .....	64
3.7 Caso de Estudo .....	70
3.8 Escolha de uma Solução.....	77
3.9 Conclusões .....	86

### **Capítulo 4 Planeamento Multiobjectivo em Redes Distribuição Radiais integrando Geração Distribuída..... 87**

4.1 Introdução .....	87
4.2 Redes de Distribuição integrando Geração Distribuída.....	88
4.3 Fiabilidade em Redes de Distribuição Integrando Geração Distribuída.....	90
4.3.1 Otimização Multiobjectivo Baseado em Três Funções Objetivo .....	91
4.3.2 Otimização Multiobjectivo Baseada em Índices Compostos .....	93

4.4 Ambiente e ENF em Redes de Distribuição integrando Recursos de Energia Renováveis. ....	95
4.5 Algoritmo de Otimização .....	97
4.6 Estudo de Caso .....	98
4.6.1 Melhoria da Fiabilidade em Redes de Distribuição Integrando GD.....	99
4.6.2 Ambiente e Redução da ENF em Redes Distribuição Integrando GD .....	109
4.7 Escolha de uma Solução.....	110
4.7.1 Fiabilidade Associada a Redes de Distribuição Elétricas .....	110
4.7.2 Ambiente e Energia não Fornecida .....	120
4.8 Conclusões .....	123

## **Capítulo 5 Planeamento Multiobjectivo em Redes Distribuição Radiais integrando Sistemas de Armazenamento de Energia ..... 125**

5.1 Introdução .....	125
5.2 Sistemas de Armazenamento de Energia para o aumento da Fiabilidade em Redes de Distribuição Radiais.....	127
5.3 Definição das Funções Objetivo para a Otimização Multiobjectivo .....	130
5.4 Algoritmo Evolutivo para a Otimização Multiobjectivo .....	132
5.5 Estudo de Caso .....	134
5.6 Escolha de uma Solução.....	139
5.7 Conclusões .....	144

## **Capítulo 6 Conclusões e Recomendações para Trabalho Futuro ..... 146**

6.1 Conclusões .....	146
6.2 Contribuições Originais .....	150
6.3 Perspetivas de Desenvolvimento Futuro .....	151

## **Capítulo 7 Bibliografia ..... 153**





## Lista de Figuras

Figura 2-1: Planeamento baseado em valor e operação na zona de bem estar social.....	13
Figura 2-2: Percentagem de Empresa Elétricas dos EUA que utilizam um determinado índice (Fonte IEEE, 1995).....	16
Figura 2-3: Rede distribuição sem dispositivos de interrupção.....	25
Figura 2-4: Rede distribuição com dois dispositivos de interrupção.....	25
Figura 2-5: Rede distribuição com geração distribuída.....	31
Figura 2-6: Aumento da fiabilidade da GD, através da otimização da ligação da GD à rede.....	32
Figura 2-7: Aumento da fiabilidade da GD, através da reconfiguração da rede para o funcionamento da rede em ilha.....	32
Figura 2-8: Rede de distribuição radial com dois sistemas de armazenamento.....	40
Figura 3-1: Efeito do número de dispositivos de interrupção sobre o número de clientes afetados. .....	46
Figura 3-2: Efeito da localização dos dispositivos de interrupção na otimização de isolamento de defeitos e no número de clientes afetados.....	46
Figura 3-3: Fronteira de Pareto.....	52
Figura 3-4: Procedimento de cálculo do algoritmo genético NSGA-II.....	58
Figura 3-5: Estrutura adotada para os indivíduos, para uma rede de N nós genéricos.....	60
Figura 3-6: Ordenação da população baseada no critério de dominância de Pareto.....	61
Figura 3-7: Diagrama simplificado de um procedimento de cálculo genérico do algoritmo memético.....	66
Figura 3-8: Diagrama de cálculo da primeira variante do algoritmo memético.....	66
Figura 3-9: Diagrama de cálculo da segunda variante do algoritmo memético.....	68
Figura 3-10: Configuração da rede de distribuição Portuguesa.....	70
Figura 3-11: Melhor fronteira de Pareto obtida usando o algoritmo NSGA-II.....	71
Figura 3-12: Melhor fronteira de Pareto usando o algoritmo memético M1.....	71
Figura 3-13: Melhor fronteira de Pareto usando o algoritmo memético M2.....	72
Figura 3-14: Melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo NSGA-II, para as funções objetivo CE vs. SAIFI.....	73
Figura 3-15: Melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo memético M1, para as funções objetivo CE vs. SAIFI.....	73
Figura 3-16: Melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIFI.....	73
Figura 3-17: Melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo NSGA-II, para as funções objetivo CE vs. SAIDI.....	74
Figura 3-18: Melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo memético M1, para as funções objetivo CE vs. SAIDI.....	74
Figura 3-19: Melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIDI.....	74
Figura 3-20: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIFI e SAIDI, para os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo NSGA-II.....	78
Figura 3-21: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIFI e SAIDI, para os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo Memético M1.....	78

Figura 3-22: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIFI e SAIDI, para os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo Memético M2. ....	79
Figura 3-23: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo NSGA-II, para as funções objetivo CE vs. SAIDI e CE vs. SAIFI.....	82
Figura 3-24: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M1, para as funções objetivo CE vs. SAIDI e CE vs. SAIFI.....	83
Figura 3-25: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIDI e CE vs. SAIFI.....	85
Figura 4-1: Fiabilidade em redes de distribuição integrando geração distribuída.....	90
Figura 4-2: Processo para obter as três funções SAIDI/SAIFI, DGUI e EC a partir dos índices compostos.....	95
Figura 4-3: Soluções não denominadas obtidas a partir da aplicação do algoritmo considerando as funções objetivo DGUI, SAIDI e CE.....	99
Figura 4-4: Visualização em 2D das soluções não dominadas obtidas com a aplicação do algoritmo, considerando as funções objetivo SAIDI vs. CE e DGUI vs. CE.....	100
Figura 4-5: Soluções não dominadas considerando as funções objetivo $CI_{SAIDI-DG}$ vs. CE.....	100
Figura 4-6: Decomposição dos resultados obtidos com a minimização do índice $CI_{SAIDI-DG}$ em SAIDI vs. CE e DGUI vs. CE.....	101
Figura 4-7: Visualização em 3D, dos resultados obtidos da fronteira de Pareto aos resultados da decomposição do índice $CI_{SAIDI-DG}$ , nos índices DGUI, SAIDI e CE.....	101
Figura 4-8: Decomposição dos resultados em 3D, de acordo com as funções objetivo SAIDI vs. CE e DGUI vs. CE.....	102
Figura 4-9: Soluções não denominadas obtidas a partir da aplicação do algoritmo considerando as funções objetivo DGUI, SAIFI e CE.....	104
Figura 4-10: Visualização em 2D das soluções não dominadas obtidas com a aplicação do algoritmo, considerando as funções objetivo SAIFI vs. CE e DGUI vs. CE.....	105
Figura 4-11: Soluções não dominadas considerando as funções objetivo $CI_{SAIFI-DG}$ vs. CE. ....	105
Figura 4-12: Decomposição dos resultados obtidos com a minimização do índice $CI_{SAIFI-DG}$ em SAIFI vs. CE e DGUI vs. CE.....	106
Figura 4-13: Visualização em 3D, dos resultados obtidos com a aplicação da fronteira de Pareto aos resultados da decomposição do índice $CI_{SAIFI-DG}$ , nos índices DGUI, SAIFI e CE.....	106
Figura 4-14: Decomposição dos resultados apresentados em 3D, de acordo com as funções objetivo SAIFI vs. CE e DGUI vs. CE.....	107
Figura 4-15: Soluções não dominadas obtidas com a aplicação do algoritmo Memético M2, considerando as funções objetivo RGEE, ENF e CE.....	109
Figura 4-16: Decomposição dos resultados apresentados em 3D, de acordo com as funções objetivo ENF vs. CE e RGEE vs. CE.....	109
Figura 4-17: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIDI e DGUI, para os resultados obtidos para a primeira abordagem com a aplicação do algoritmo Memético M2. ....	111
Figura 4-18: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIDI e DGUI, para os resultados obtidos para a segunda abordagem com a aplicação do algoritmo Memético M2. ....	112
Figura 4-19: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIFI e DGUI, para os resultados obtidos para a segunda abordagem com a aplicação do algoritmo Memético M2. ....	113
Figura 4-20: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIFI e DGUI, para os resultados obtidos para a segunda abordagem com a aplicação do algoritmo Memético M2. ....	114

Figura 4-21: Solução adotada na primeira abordagem, pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIDI e CE vs. DGUI.....	115
Figura 4-22: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIDI e CE vs. DGUI.....	117
Figura 4-23: Solução adotada na primeira abordagem, pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIFI e CE vs. DGUI. ....	118
Figura 4-24: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIFI e CE vs. DGUI. ....	120
Figura 4-25: Variação do investimento em equipamentos vs. variação na ENF e RGEE, para os resultados obtidos para a segunda abordagem com a aplicação do algoritmo Memético M2. ....	121
Figura 4-26: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. ENF e CE vs. RGEE. ....	122
Figura 5-1: Rede de Distribuição sem Sistemas de Armazenamento de Energia. ....	127
Figura 5-2: Rede de distribuição com um Sistema de Armazenamento de Energia. ....	128
Figura 5-3: Rede de distribuição com dois Sistemas de Armazenamento de Energia. ....	128
Figura 5-4: Soluções não dominadas obtidas com a aplicação do algoritmo genético memético, às funções objetivo MAIFI, SAIDI e CE.....	134
Figura 5-5: Decomposição dos resultados apresentados em 3D, de acordo com as funções objetivo MAIFI vs. CE. ....	135
Figura 5-6: Decomposição dos resultados apresentados em 3D, de acordo com as funções objetivo SAIDI vs. CE.....	135
Figura 5-7: Soluções não dominadas obtidas com a aplicação do algoritmo genético memético, às funções objetivo MAIFI, SAIFI e CE. ....	137
Figura 5-8: Decomposição dos resultados apresentados em 3D, de acordo com as funções objetivo MAIFI vs. CE. ....	137
Figura 5-9: Decomposição dos resultados apresentados em 3D, de acordo com as funções objetivo SAIFI vs. CE. ....	138
Figura 5-10: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIDI e MAIFI, para os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo Memético M2. ....	139
Figura 5-11: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIFI e MAIFI, para os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo Memético M2. ....	140
Figura 5-12: Solução adotada na primeira abordagem, pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIDI e CE vs. MAIFI .....	142
Figura 5-13: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIFI e CE vs. MAIFI. ....	144



## Lista de Tabelas

Tabela 3-1: Comparação das melhores e piores soluções obtidas com a aplicação dos três algoritmos. ....	75
Tabela 3-2: Número e localização dos dispositivos de interrupção para as melhores e piores soluções obtidas com a aplicação dos três algoritmos.....	76
Tabela 3-3: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo NSGA-II. ....	81
Tabela 3-4: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M1. ....	82
Tabela 3-5: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2. ....	84
Tabela 4-1: Potência da GD e respetiva secção de ligação à rede de distribuição Radial .....	99
Tabela 4-2: Melhores resultados para cada uma das funções objetivo, obtidas com a aplicação das duas abordagens. ....	103
Tabela 4-3: Número e localização dos dispositivos de interrupção para as soluções extremas considerando a função objetivo CE. ....	103
Tabela 4-4: Melhores resultados para cada uma das funções objetivo, obtidas com a aplicação das duas abordagens .....	107
Tabela 4-5: Número e localização dos dispositivos de interrupção para as soluções extremas considerando cada função objetivo. ....	108
Tabela 4-6: Número e localização dos dispositivos de interrupção para as soluções extremas considerando cada função objetivo. ....	110
Tabela 4-7: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2 considerando a primeira abordagem. ....	115
Tabela 4-8: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2 considerando a segunda abordagem. ....	116
Tabela 4-9: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2 considerando a primeira abordagem. ....	118
Tabela 4-10: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2 considerando a segunda abordagem. ....	119
Tabela 4-11: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2. ....	122
Tabela 5-1: Melhores soluções considerando cada função objetivo (MAIFI, SAIDI, CE), e localização dos sistemas de armazenamento e dispositivos de interrupção. ....	136
Tabela 5-2: Melhores soluções considerando cada função objetivo (MAIFI, SAIFI, CE), e localização dos sistemas de armazenamento e dispositivos de interrupção. ....	138
Tabela 5-3: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2. ....	141
Tabela 5-4: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2. ....	143



## Lista de Siglas

μGA	Micro Genetic Algorithm
ACS	Ant Colony System
AEMO	Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo
AENS	Average Energy Not Supplied
ASAI	Average Service Availability Index
CAIDI	Customer Average Interruption Duration Index
CAPEX	Capital Expenditure
CAPEX	Capital Expenditure
DER	Distributed Energy Resources
DG	Distributed Generation
DSTATCOM	Distribution Static Synchronous Compensator
EENS	Expected Energy Not Supplied
ENS	Energy Not Supplied
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
FLISR	Fault, Location, Isolation and Service Restore
GA	Genetic Algorithm
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MAIFI	Momentary Average Interruption Frequency Index
MOGA	Multi Objective Genetic Algorithm
MPGA	Multiple-Population Genetic Algorithm
MV	Medium Voltage
NPGA	Niched Pareto Genetic Algorithm
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
PAES	Pareto Archive Devolution Strategy
PSO	Particle Swarm Optimization
RED	Recursos Energéticos Distribuidos
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
TSA	Tabu Search Algorithm
VEGA	Las Vegas Algorithm





## Introdução

### 1.1 PREÂMBULO

O Planeamento das Redes de Distribuição de Energia Elétrica tem sido motivo de atenção, em especial desde o surgimento dos primeiros modelos matemáticos [1]. A longo prazo, a expansão das redes de distribuição é estudada pela definição da localização das subestações, dos níveis de tensão, pela seleção do trajeto e interligações entre alimentadores, pelas características das linhas e pelos equipamentos de reconfiguração da rede. O objetivo consiste em satisfazer a procura de energia elétrica com o custo mínimo. Isto inclui o investimento em transformadores, linhas e equipamentos de proteção, seccionamento e reconfiguração. O planeamento em redes de distribuição é frequentemente levado a cabo segundo três abordagens diferentes [2]. A primeira abordagem consiste no planeamento do projeto ideal para a expansão da rede de distribuição, tanto para o crescimento futuro de clientes como para as novas cargas previstas. A segunda abordagem denominada de “*Planeamento Greenfield*” baseia-se no projeto ideal de toda a rede de distribuição para o consumo real, assumindo a não existência de uma rede atual. Pode-se então determinar as diferenças entre a rede ideal projetada e a rede real existente. Conhecida como planeamento da operação, a terceira abordagem consiste na otimização da operação da rede existente, através da análise de diferentes combinações de operação, a fim de diminuir as perdas e aumentar a fiabilidade do sistema para um determinado horizonte de tempo. Nos últimos anos, as mudanças

climáticas elevaram a consciência internacional sobre os impactos que a geração de eletricidade e o uso de energia têm no meio ambiente. Neste contexto, a produção e o uso local de fontes de energia renováveis são consideradas como algumas das opções mais promissoras para fornecimento de energia mais segura, limpa e eficiente. A Geração Distribuída (GD) é definida como "uma fonte de energia elétrica conectada diretamente à rede de distribuição ou no lado da contagem do cliente" [3]. As tecnologias mais comuns de GD incluem a geração de eletricidade a partir de produção fotovoltaica, geradores eólicos e sistemas hídricos de micro geração. No momento, a GD é considerada dentro do conceito mais amplo de Recursos Energéticos Distribuídos (RED) que também inclui o armazenamento de energia. Num futuro próximo é expectável que se assista à utilização maciça de sistemas de energias renováveis na forma de GD. De modo a maximizar o benefício de tal utilização, são imperativas novas filosofias de desenho de topologias de redes e de restauração rápida após perturbações no sistema. Se a GD for corretamente integrada na rede elétrica [4], podem ser obtidos vários benefícios, como por exemplo:

- ✓ Se localizadas próximo dos centros de consumo e com a produção coincidente com a procura, permite a redução do trânsito de energia nas linhas, resultando numa melhoria do perfil de tensão e redução das perdas de energia;
- ✓ Se a GD produzir energia em períodos de pico de carga, os investimentos na rede podem ser adiados;
- ✓ Aumento da fiabilidade se a GD de produção constante estiver ligada a redes malhadas.

Por outro lado, se localizados erradamente, podem surgir impactos negativos como fluxos de potência inversa, aumento de perdas nas linhas e perfis de tensão desadequados. Assim, os impactos técnicos da GD podem limitar a sua instalação e restringir os benefícios económicos e ambientais a eles associados. Em redes rurais de pequena potência, onde é esperada a ligação de grandes quantidades de recursos renováveis, os impactos no aumento de tensão e na capacidade térmica das linhas poderão limitar a integração destes recursos. Em redes urbanas malhadas, onde um grande número de micro unidades de geração de energia poderiam potencialmente ser instaladas, os limites térmicos e a coordenação de proteções, serão os fatores limitativos mais comuns a restringir estas ligações. No GRID 2030 (*United States Department of Energy*) [5], documento que reflete a visão do Departamento de Energia dos EUA para as

infraestruturas elétricas do século XXI, é também preconizada a introdução de controlos e equipamentos “inteligentes” para a rede existente. A maior parte da “inteligência” está prevista para ser incorporada nos sistemas de distribuição, uma vez que é neste nível de tensão que se verifica o maior número de defeitos. A fim de criar o sistema de distribuição do século XXI, estão previstas várias soluções inovadoras para os sistemas de distribuição existentes, que incluem por exemplo [6]:

- ✓ O aumento do uso de controlo digital e tecnologia da informação com disponibilidade em tempo real;
- ✓ A otimização dinâmica relativo à operação de rede;
- ✓ A inclusão de sistemas de resposta do lado da procura e de sistemas de gestão da procura;
- ✓ A integração de recursos distribuídos, incluindo as energias renováveis e sistemas de armazenamento de energia;
- ✓ A larga utilização de contadores “inteligentes”, sistemas de automação da distribuição e eletrodomésticos “inteligentes”.

A intenção de aumentar a “inteligência” da estrutura elétrica, visa incrementar a eficiência e fiabilidade da rede [7]. É interessante confrontar as novas tecnologias de rede inteligentes com o clássico projeto de sistemas de distribuição [8]. Uma conclusão desse exercício é que os projetos com as novas tecnologias de rede inteligentes devem ter os mesmos ou melhores níveis de segurança e fiabilidade em comparação com o projeto clássico, o que por si só, mantém e atualiza o interesse no problema de reconfiguração da rede.

## 1.2 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

O planeamento e operação dos sistemas de distribuição consiste em satisfazer a procura de energia, o mais economicamente possível, garantindo a continuidade da oferta e os níveis de qualidade contratados. Normalmente, as abordagens, que as empresas elétricas públicas tendem a implementar consiste em projetar e operar as infraestruturas de distribuição elétrica para minimizar o custo total para a sociedade. Geralmente, esta abordagem é referida como planeamento baseado em valor. Por outro lado, as empresas

privadas tendem a diferir no tempo os investimentos na rede para maximizar o seu retorno. O seu objetivo consiste no fornecimento de energia elétrica de forma segura e fiável a um custo razoável. As tendências recentes mostram, contudo, que o foco futuro não será apenas no desempenho económico das empresas, mas sim na combinação entre o desempenho com impacto nos negócios e no desempenho com impacto no bem-estar social e nos fatores ambientais. Deste modo pretende-se que as empresas operem na zona onde sejam maximizados os benefícios para a totalidade dos intervenientes. O envelhecimento de infraestruturas e a fiabilidade da rede são das questões que mais preocupam os gestores das empresas elétricas, estando as duas intimamente relacionadas. Uma diminuição do investimento em infraestruturas diminui com o tempo a fiabilidade da rede. Por outro lado, um aumento no investimento na rede aumenta a fiabilidade do sistema. O foco na fiabilidade têm em conta que os efeitos da falta de energia ultrapassam o inconveniente experimentado pelos consumidores devido à própria interrupção. As falhas de energia custam muito dinheiro às empresas em vendas perdidas, interrupção de fabrico e informação perdida. Mas o custo económico das interrupções vai muito além da produtividade perdida. Uma interrupção de vários dias pode causar muitas perdas aos clientes residenciais por exemplo na conservação de alimentos. Neste contexto a colocação ótima de equipamentos de interrupção é uma das áreas que mais contribui para a operação das empresas na zona de bem-estar social. Ao escolher o local e o número ideal de equipamentos de interrupção na rede elétrica de distribuição, é possível maximizar o quociente entre os benefícios para a comunidade e os investimentos feitos pela empresa elétrica na rede. Ao alterar o estado dos interruptores (aberto/fechado) a rede de distribuição pode ser reconfigurada, depois de um defeito, minimizando assim o número de clientes afetados, a duração e a frequência de interrupção.

#### 1.2.1 QUESTÕES DE INVESTIGAÇÃO

As questões de investigação consideradas neste trabalho foram as seguintes:

- I. Qual é o número ideal, o tipo e a localização de dispositivos de interrupção numa rede de distribuição, que maximiza a fiabilidade da rede tendo a preocupação de minimizar o custo dos equipamentos?

- II. Qual é o número ideal, o tipo e a localização de dispositivos de interrupção numa rede de distribuição, que maximiza a disponibilidade da geração distribuída e um índice de fiabilidade minimizando ao mesmo tempo o custo dos equipamentos?
- III. Qual é o número, a potência e a localização de dispositivos de armazenamento numa rede de distribuição, que maximiza a fiabilidade da rede para interrupções de curta duração e para interrupções de longa duração, minimizando ao mesmo tempo o custo dos equipamentos?

### 1.2.2 HIPÓTESE

O número, o tipo e a localização dos equipamentos de interrupção numa rede de distribuição pode ser obtido através de um problema de otimização. A colocação de dispositivos de interrupção na rede elétrica é um problema de otimização multiobjectivo considerando os objetivos conflituosos e sujeitos a uma lista de restrições. Não existe uma única solução ótima para um problema multiobjectivo, normalmente existem soluções possíveis de “*compromisso*” entre os diversos objetivos para o decisor escolher a que lhe parece melhor. Assim, uma conceção de conjunto ótimo de “*Pareto*”, um conjunto de soluções possíveis não dominadas, no sentido de que nenhuma melhoria pode ser conseguida em qualquer objetivo sem uma degradação nos outros, é introduzido como solução para o problema em causa.

### 1.2.3 ABORDAGEM PARA O TESTE DA HIPÓTESE

A hipótese será testada através do desenvolvimento e aplicação de algoritmos de otimização aplicados a uma rede de distribuição real. Estes algoritmos serão desenvolvidos considerando a sua adequabilidade ao problema em causa. Os algoritmos a desenvolver serão executados e aplicados a uma rede de distribuição real e os resultados serão analisados e comparados. Para a resolução do problema em causa, será necessário a seguinte informação da rede: o comprimento, a taxa média de defeito e o tempo médio

por defeito relativo a cada troço assim com a potência e o número de clientes para cada nó.

### 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO E METODOLOGIAS

Os principais objetivos do trabalho apresentado nesta dissertação relacionam-se com o planeamento das redes de distribuição, considerando a colocação de dispositivos de interrupção nas redes de modo a melhorar a sua fiabilidade. A melhoria da fiabilidade da rede tem por objetivo a redução do número de consumidores afetados por um defeito ou uma interrupção para efeitos de serviço. Esta redução pode ser conseguida com colocação de dispositivos de interrupção nas redes de distribuição radiais. O maior ou menor alcance da redução do número de consumidores afetados por uma interrupção, depende do número, da localização e do tipo de dispositivo de interrupção. No entanto quanto mais dispositivos de interrupção existirem, maior o investimento necessário na rede. Tendo em conta que o investimento das empresas de distribuição é limitado, serão propostos algoritmos multiobjectivo, do tipo evolutivo, para otimizar a melhoria da fiabilidade da rede tendo em conta o investimento em equipamentos de interrupção de rede. Através deste trabalho de investigação será possível obter melhorias da fiabilidade das redes de distribuição, considerando não apenas os índices de fiabilidade mas um compromisso entre estes e o custo de investimento em equipamentos de dispositivos de interrupção. Verifica-se também que a geração distribuída tem vindo a aumentar nas redes de distribuição e que o seu maior ou menor aproveitamento está intimamente ligado à fiabilidade da rede. Tal como na situação das redes de distribuição clássicas (onde apenas existem consumidores), podem-se utilizar os dispositivos de interrupção, não só para aumentar a fiabilidade da rede sob o ponto de vista dos consumidores, mas também para aumentar a disponibilidade do ponto de ligação da rede à geração distribuída. Neste trabalho, com o desenvolvimento de um algoritmo de otimização multiobjectivo do tipo evolutivo, procura-se maximizar a fiabilidade da rede tendo em vista os consumidores e a disponibilidade da ligação da geração distribuída, interligado com o investimento em equipamentos de interrupção da rede. Dada a importância que hoje em dia este tipo de geração tem, diversos trabalhos foram apresentados no sentido de otimizar a localização dos equipamentos de seccionamento para a reconfiguração da rede de modo a manter a

produção de energia elétrica mesmo em situação de defeito nas linhas. Estes trabalhos procuram maximizar a disponibilidade da geração distribuída, mas apenas com operação em ilha. No entanto, este tipo de operação não é permitida pela legislação da grande maioria dos países, como ainda levanta diversas questões técnicas que poderão tornar esta solução inviável. Neste contexto, esta investigação irá abordar o problema da maximização da disponibilidade da geração distribuída sem operação em ilha, minimizando ao mesmo tempo a indisponibilidade da rede para os consumidores e o investimento em equipamentos.

Tradicionalmente as interrupções de longa duração têm captado a atenção das empresas elétricas. No entanto, as interrupções momentâneas estão a tornar-se uma matéria de grande preocupação, principalmente devido aos seus impactos sobre os novos tipos de carga sensíveis a defeitos.

Neste contexto, este trabalho irá considerar a colocação de sistemas de armazenamento de energia e equipamentos de interrupção na rede, para reduzir o número de consumidores afetados por interrupções de curta duração. A otimização destes sistemas de armazenamento de energia e equipamentos de interrupção na rede, será obtida através do desenvolvimento de um algoritmo multiobjectivo, do tipo evolutivo. Deste modo será possível otimizar a fiabilidade das redes de distribuição radiais tendo em consideração as interrupções de curta e longa duração assim como o investimento em equipamentos de interrupção. De modo a atingir estes objetivos desenvolveram-se as seguintes ações:

- ✓ Elaboração de modelos matemáticos associados aos índices de fiabilidade das redes de distribuição radiais e custos de equipamentos para a sua integração no problema de otimização multiobjectivo;
- ✓ Desenvolvimento e implementação de algoritmos multiobjectivo do tipo evolutivo para a resolução deste problema, composto por várias funções objetivo contraditórias entre si;
- ✓ Elaboração de modelos matemáticos para a integração da geração distribuída no problema de otimização multiobjectivo da fiabilidade das redes de distribuição radiais. Estes modelos permitem a abordagem da maximização da geração distribuída sob um ponto de vista diferente do usual, nomeadamente no funcionamento sem ser em ilha. Ao nível da integração da geração distribuída também foram propostos modelos matemáticos para otimizar a minimização das

emissões de gases de efeito de estufa, no contexto da fiabilidade das redes de distribuição radiais;

- ✓ Proposta de uma nova abordagem que considere a redução de interrupções momentâneas, nomeadamente através da utilização de sistemas de armazenamento. No âmbito desta proposta, desenvolveram-se modelos matemáticos para a sua integração no problema de otimização multiobjectivo. Neste problema, para além da fiabilidade ao nível das interrupções momentâneas também se consideraram as interrupções de longa duração.
- ✓ Implementação das abordagens adotadas através de estudos de casos, onde é utilizada uma rede de distribuição radial real. Estudo dos resultados obtidos, através da análise das diversas soluções de caráter conflituoso, comparação de algoritmos de otimização e estratégias propostas.

Finalmente, também se espera contribuir para o aumento do conhecimento relacionado com a colocação de dispositivos de interrupção nas redes de distribuição radiais.

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O texto desta dissertação apresenta-se organizado em seis capítulos. Salienta-se que ao longo da dissertação, quando considerado conveniente, fez-se uso de ilustrações de modo a facilitar a compreensão dos assuntos durante o respetivo processo de leitura. No primeiro capítulo, o atual, descreve-se de uma forma resumida o enquadramento, a motivação e os objetivos desta dissertação. Descrevem-se também as ações desenvolvidas para atingir os objetivos pretendidos para este trabalho.

No Capítulo 2 introduz-se o problema da fiabilidade em redes de distribuição radiais, assim como os índices mais utilizados na medição da fiabilidade deste tipo de redes. É também analisada a fiabilidade em redes de distribuição radiais integrando dispositivos de interrupção, geração distribuída e sistemas de armazenamento de energia.

No Capítulo 3 apresenta-se o estudo de um caso para a melhoria da fiabilidade em redes de distribuição radiais através da introdução de dispositivos de interrupção na rede. Neste estudo foram utilizados dois algoritmos de otimização multiobjectivo.



No Capítulo 4 considera-se a existência de geração distribuída integrada na rede de distribuição radial. Os dispositivos de interrupção são utilizados para aumentar quer a fiabilidade da rede de distribuição, quer a disponibilidade da ligação dos geradores à rede.

No Capítulo 5 considera-se o estudo de um caso para a melhoria da fiabilidade da rede tendo em conta os defeitos de curta duração. Para este objetivo, considerou-se a existência de sistemas de armazenamento de energia na rede de distribuição. Estes dispositivos são utilizados para aumentar a fiabilidade da rede relativamente aos defeitos de curta duração. Por outro lado, são também considerados dispositivos de interrupção para aumentar a fiabilidade da rede tendo em conta os defeitos de longa duração.

Finalmente no Capítulo 6 são enumeradas as conclusões retiradas com a elaboração da dissertação. São também descritos os trabalhos futuros que podem ser realizados no âmbito deste tema.



## **Fiabilidade em Redes de Distribuição Radiais**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

A energia elétrica é um elemento vital em qualquer economia moderna. A disponibilidade de fornecimento de energia elétrica a um preço razoável é crucial para o desenvolvimento e crescimento de um país. As empresas elétricas em todo o mundo tentam deste modo responder à procura dos consumidores o mais economicamente possível e com um nível razoável de fiabilidade. Para corresponder à procura dos consumidores, as empresas elétricas têm que se desenvolver e o sistema de distribuição tem de ser atualizado, operado e mantido de acordo com esse desenvolvimento. Análises realizadas um pouco por todo o mundo mostram que cerca de 90% das interrupções no sistema elétrico devem-se a problemas ocorridos no sistema de distribuição [9]. Assim, o melhoramento da fiabilidade das redes de distribuição é crucial para o melhoramento da fiabilidade sentida pelos clientes. Cada vez mais as empresas elétricas estão a ser confrontadas com objetivos contraditórios de clientes que requerem maior qualidade de serviço (com custos maiores) e dos que querem preços de energia mais baixos. Para competir neste contexto, é importante que as empresas elétricas estabeleçam um balanço entre os custos de investimento em equipamentos para aumentar a fiabilidade e o nível de fiabilidade alcançado com esse investimento. Sendo a fiabilidade um termo abstrato significando durabilidade, robustez e bom desempenho, em sistemas de engenharia é mais que um termo abstrato, é algo que pode ser medido, avaliado, planeado e introduzido num

equipamento ou sistema. A fiabilidade significa a capacidade de um sistema de cumprir com as funções para que foi desenhado, sobre as condições de operação e durante o tempo de vida especificado. Idealmente, um sistema de energia elétrico do ponto de vista dos consumidores compreende uma alimentação ininterrupta de energia. Neste âmbito as empresas elétricas necessitam de informação mais precisa sobre a fiabilidade das redes para assegurar que os investimentos são corretamente aplicados e que as expectativas dos clientes são alcançadas. Para conhecer o nível de qualidade do fornecimento da energia elétrica, foram desenvolvidos diversos índices para medir a fiabilidade das redes de distribuição. Nestes índices, entre outros, estão incluídos a medição do tempo e da frequência das interrupções, a disponibilidade do sistema e o tempo de resposta. Neste capítulo apresentam-se os índices de fiabilidade mais utilizados pelas empresas de energia elétrica assim como uma revisão sumária de diversos trabalhos desenvolvidos no contexto do planeamento de redes de distribuição radiais incorporando dispositivos de interrupção, geração distribuída renovável e sistemas de armazenamento de energia.

## 2.2 AVALIAÇÃO DE FIABILIDADE

O objetivo de uma análise de fiabilidade consiste em responder à questão “a fiabilidade do sistema é suficiente?” ou “que configuração falhará menos?” ou ainda “onde se poderá gastar o próximo euro da melhor maneira para melhorar o sistema?” [10]. A fiabilidade nas redes de distribuição pode ser abordada sob dois aspetos, a adequabilidade do sistema e a segurança do sistema. A adequabilidade do sistema relaciona-se com a capacidade do sistema responder à procura de energia enquanto que a segurança do sistema está relacionada com a resposta dinâmica do sistema a perturbações (como as interrupções). Deste modo, a adequabilidade do sistema representa as condições estáticas e a segurança do sistema relaciona-se com as condições dinâmicas do sistema. Considerando que os sistemas de distribuição raramente se encontram próximos do valor limite de fornecimento, a preocupação com a adequabilidade é relativamente pequena, sendo o ênfase dado à segurança do sistema. Uma das principais questões que se coloca a um sistema de distribuição consiste em fornecer energia elétrica aos consumidores, com qualidade e fiabilidade e a preços razoáveis. Uma forma prática de avaliar a fiabilidade que tem vindo a ser largamente utilizada consiste na avaliação do impacto que uma

interrupção tem nos consumidores. Quando uma interrupção é sentida por um consumidor, existe um certo valor monetário que ele admite pagar para não a voltar a sentir. Este valor é referido como “o custo da fiabilidade do cliente”. Estes custos consideram tanto os custos tangíveis como os intangíveis assim como os custos de oportunidade. Como tal, para maximizar a fiabilidade, a empresa elétrica deverá obter um equilíbrio entre o custo de melhoria da sua fiabilidade e o custo da fiabilidade do consumidor (Figura 2-1). Nesta perspetiva, o nível de fiabilidade ótimo encontra-se quando o custo da empresa elétrica e o custo do consumidor estão no ponto de encontro das duas curvas.

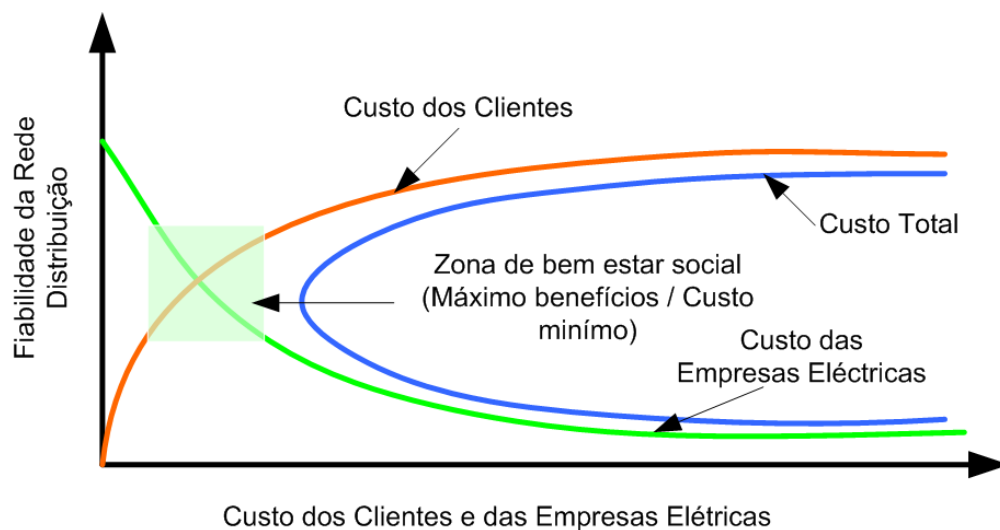


Figura 2-1: Planeamento baseado em valor e operação na zona de bem estar social.

Planear e operar um sistema de distribuição para minimizar o custo total para a sociedade é referido como “Planeamento Baseado no Valor”. Este tipo de abordagem é geralmente o objetivo das empresas elétricas públicas e tem sido imposto em certos países, como a Noruega. As empresas privadas de energia elétrica tendem a maximizar os lucros em vez de minimizar os custos totais da sociedade. Para estas, presumivelmente a minimização dos custos totais é alcançada satisfazendo todas as regulamentações ao menor custo possível.

## 2.3 FIABILIDADE E DEFINIÇÕES ASSOCIADAS

A fiabilidade nas redes de distribuição está primariamente ligada aos defeitos nos equipamentos e às interrupções aos consumidores. Nas condições normais de funcionamento, todos os equipamentos, exceto os que estão em espera (*standby*), estão sob tensão assim como todos os consumidores. Eventos planeados e não planeados, alteram as condições normais de funcionamento, podendo levar a interrupções de serviço. Algumas das principais definições ligadas à fiabilidade em redes de distribuição (referidas pela norma IEEE 1366 [11]) são descritas de acordo com as seguintes definições:

**Contingência:** evento inesperado ou não planeado, como uma interrupção ou circuito aberto.

**Circuito aberto:** um ponto do circuito que interrompe o trânsito de potência sem causar o aparecimento de uma corrente de defeito.

**Interrupção:** são normalmente causadas por defeitos de isolamento no sistema e que podem ser caracterizados como auto extinção (*self clearing*), temporárias ou permanentes. Uma interrupção de auto extinção extingue-se a ela própria sem qualquer intervenção exterior. Uma interrupção temporária é originada por um curto-circuito que desaparecerá com a colocação da tensão da rede a zero. Uma interrupção permanente é um curto-circuito que persiste e tem que ser reparado através da intervenção humana.

**Interrupção Momentânea:** uma operação de um dispositivo de interrupção que resulta num valor de tensão zero, com um tempo normalmente inferior a 5 minutos;

**Evento de Interrupção Momentânea:** uma interrupção de duração limitada ao tempo necessário para o dispositivo de interrupção restabelecer a alimentação, normalmente inferior a 5 minutos;

**Interrupção Sustentada ou de Longa Duração:** qualquer interrupção que não seja classificada como interrupção momentânea.

Aspectos básicos intimamente ligados à fiabilidade das redes de distribuição, são a disponibilidade e indisponibilidade. Sendo que um é o complemento do outro e normalmente são definidos em percentagem. De um modo simplificado, podemos defini-las do seguinte modo:

**Disponibilidade:** a probabilidade da rede estar sob tensão.

**Indisponibilidade:** a probabilidade da rede não estar sob tensão.

A indisponibilidade pode ser calculada diretamente a partir da duração das interrupções verificadas na rede. Se um consumidor experimentar 9 horas de interrupções num ano, a indisponibilidade é igual a  $9/8760$  (horas/ano) = 0,1%. A disponibilidade da rede é então de 99,9%. Com o aumento das cargas sensíveis na rede, tornou-se normal descrever níveis altos de fiabilidade [12], nomeadamente através do número de vezes que o “9” aparece na disponibilidade. Isto é, no caso anterior o número de vezes que o “9” aparece é de três. Por exemplo, muitas fábricas com cargas sensíveis requerem um nível de fiabilidade de seis “9”, portanto uma disponibilidade de 99.9999% (26,25 segundos por ano de indisponibilidade). Já centros de dados ligados à internet podem requerer uma fiabilidade até nove “9”, isto é, uma fiabilidade de 99.9999999% (1,58 ciclos – 50Hz), menos de 2 ciclos de interrupção anual.

## 2.4 ÍNDICES DE FIABILIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

A fiabilidade dos sistemas de distribuição é usualmente medida com diversos índices de fiabilidade baseados em estatísticas de dados de interrupções do sistema de distribuição. Cada índice de fiabilidade representa um aspeto particular da fiabilidade de um alimentador, de parte de uma rede ou de toda a rede de distribuição. A função destes índices consiste por um lado, no fornecimento de informação útil relativo ao desempenho do sistema e por outro, no fornecimento de dados históricos para avaliar tendências de fiabilidade. Um modo comum de agrupar os diversos índices de fiabilidade consiste em agrega-los tendo em conta se são baseados nos clientes ou na carga. Os primeiros não estabelecem nenhuma diferenciação entre clientes, tratando-os todos de igual modo. Os segundos possibilitam a diferenciação entre os clientes de maior potência face aos de menor potência. No entanto a qualidade de serviço mínima estabelecida pela maioria das

Entidades Reguladoras nos vários países baseia-se nos índices baseados nos clientes. Isto é, estabelece-se a qualidade mínima para todos, não diferenciando os clientes. No entanto, a utilização dos índices baseados na carga por parte das empresas elétricas, poderá ser interessante para diferenciar os clientes de maior consumo (potência) que representam maior faturação. De qualquer modo, a utilização destes índices não dispensa as empresas elétricas do cumprimento dos padrões mínimos estabelecidos pelos índices baseados nos clientes. Inquéritos realizados pelo IEEE no âmbito da norma 1366 a diversas empresas elétricas nos EUA relativamente aos índices por elas utilizados concluíram que são os índices SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*), SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*), CAIDI (*Customer Average Duration Index*), ASAI (*Average Service Availability Index*) e MAIFI (*Momentary Average Interruption Frequency Index*) os mais utilizados, todos eles baseados nos clientes. Na Figura 2-2 apresenta-se a um gráfico referente a um estudo efetuado pelo IEEE em 1995, onde é possível confirmar os índices de fiabilidade mais utilizados pelas empresas de energia elétrica dos EUA.

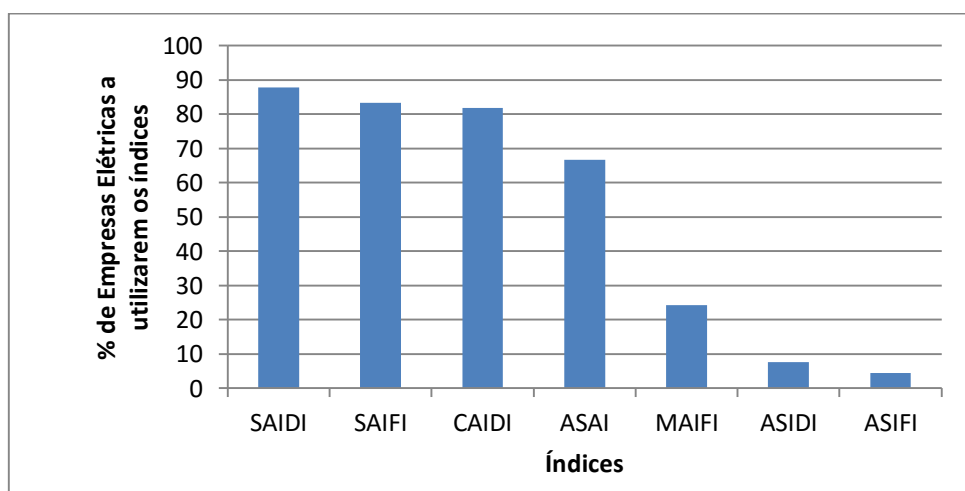


Figura 2-2: Percentagem de Empresa Elétricas dos EUA que utilizam um determinado índice (Fonte IEEE, 1995).

Como é possível verificar, para interrupções longas, os índices mais utilizados são os índices SAIDI e SAIFI. Para interrupções de curta duração o índice mais utilizado é o índice MAIFI.



#### 2.4.1 ÍNDICES DE FIABILIDADE BASEADOS NO CLIENTES

Os índices mais comumente utilizados nas redes de distribuição elétricas, são os índices baseados nos clientes, que pesam cada cliente de modo igual. Este tipo de índices são também os mais utilizados pelas Entidades Reguladoras, porque para estes, o pequeno cliente residencial tem a mesma importância que um grande cliente industrial. Embora com algumas limitações (tratam todos os clientes de modo igual), este tipo de índices são genericamente considerados como bons agregadores de medidas de fiabilidade e são largamente utilizados como referências e objetivos de fiabilidade. Estes índices, definidos na norma do IEEE 1366, são descritos de seguida:

##### SAIDI - System Average Interruption Duration Index

Este é um dos índices mais utilizados para medir interrupções de longa duração. O índice SAIDI mede a duração média de interrupção que um cliente pode esperar experimentar durante um determinado tempo, normalmente de um ano. É normalmente medido em minutos de interrupção por cliente. Matematicamente é representado pela seguinte equação:

$$SAIDI = \frac{\text{Duração Total das Interrupções aos Clientes}}{\text{Número Total de Clientes Servidos}} = \frac{\sum_i (t_i \times N_i)}{N_T} \quad (2-1)$$

onde:

$t_i$  É o tempo médio de interrupção para o troço  $i$ ;

$N_i$  Clientes afetados por um defeito no troço  $i$ ;

$N_T$  Número total de clientes servidos.

##### SAIFI - System Average Interruption Frequency Index

Outro dos índices mais utilizados para a medição de interrupções de longa duração é o índice SAIFI. Este índice representa o número de interrupções anuais que cada cliente pode, em média, esperar experimentar, sendo expresso pela seguinte expressão:

$$SAIFI = \frac{\text{Número Total das Interrupções aos Clientes}}{\text{Número Total de Clientes Servidos}} = \frac{\sum_i (f_i \times N_i)}{N_T} \quad (2-2)$$

onde:

$f_i$  É a frequência média de interrupção para o troço  $i$ ;

$N_i$  Clientes afetados por um defeito no troço  $i$ ;

$N_T$  Número total de clientes servidos.

#### CAIDI - Customer Average Interruption Duration Index

Este índice representa o tempo médio para restaurar o serviço a um cliente, por interrupção sustentada, isto é uma interrupção que tem uma duração superior a 5 minutos. Neste índice estão integrados os índices SAIDI e SAIFI, tal como se pode verificar pela seguinte expressão matemática:

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} = \frac{\sum_i (f_i \times t_i)}{\sum_i (f_i)} \quad (2-3)$$

onde:

$f_i$  É a frequência média de interrupção para o troço  $i$ ;

$t_i$  É o tempo médio de interrupção para o troço  $i$ ;

#### ASAI - Average Service Availability Index

Este índice representa a fração de tempo (normalmente em percentagem) que um cliente é alimentado durante um determinado período de tempo, usualmente de um ano. Matematicamente é representado pela seguinte expressão:

$$ASAI = \frac{\text{Disponib. serviço ao cliente (hr)}}{\text{Procura serviço pelo cliente (hr)}} = \frac{N_T \times 8760 - \sum_i (t_i \times N_i)}{N_T \times 8760} \quad (2-4)$$

onde:

- $t_i$       É o tempo médio de interrupção para o troço  $i$ ;  
 $N_i$       Clientes afetados por um defeito no troço  $i$ ;  
 $N_T$       Número total de clientes servidos.

O aumento das cargas sensíveis a interrupções momentâneas ou de curta duração, gerou uma necessidade de utilização de índices que medissem a fiabilidade da rede relativamente a este tipo de interrupções. Dois índices têm-se tornado padrão. Um é deles é baseado na frequência das interrupções momentâneas, o outro, na frequência dos eventos de interrupção momentânea. Estes índices, são também propostos pela norma do IEEE 1366 [13], de acordo com as definições que se descrevem de seguida:

*MAIFI - Momentary Average Interruption Frequency Index*

Para interrupções momentâneas ou de curta duração o índice mais utilizado é o MAIFI. É semelhante ao SAIFI mas neste caso mede as interrupções momentâneas e não as de longa duração, sendo representado pela expressão seguinte:

$$MAIFI = \frac{\sum_i (ID_i \times N_i)}{N_T} \quad (2-5)$$

onde:

- $ID_i$       Número de interrupções do dispositivo de interrupção que afeta o troço  $i$ ;  
 $N_i$       Clientes afetados por um defeito no troço  $i$ ;

*MAIFI<sub>E</sub> - Momentary Average Interruption Event Frequency Index*

Outro dos índices que também aparece relacionado com as interrupções momentâneas ou de curta duração, é o índice MAIFI<sub>E</sub> que utiliza o número de eventos (conjunto de operações associadas à eliminação de um defeito) realizados por um dispositivo de interrupção em vez do número de operações desse dispositivo para eliminar o defeito.

Este índice é descrito pela seguinte expressão:

$$MAIFI_E = \frac{\sum_i (ID_E \times N_i)}{N_T} \quad (2-6)$$

onde:

- $ID_E$  Número de eventos de interrupção do dispositivo de interrupção;
- $N_i$  Clientes afetados por um defeito no troço  $i$ ;
- $N_T$  Número total de clientes servidos.

O índice  $MAIFI_E$  é o preferido pelas empresas elétricas pela simplicidade de obtenção de dados, uma vez que pode ser contabilizado através do número de operações dos equipamentos de proteção [12]. No entanto, embora com uma maior complexidade na obtenção de informação, o índice  $MAIFI$  reflete melhor a satisfação do cliente, dado que vários eventos concentrados no tempo (inferior a 5 minutos) têm um menor impacto que o mesmo número de interrupções espaçados ao longo de semanas ou meses.

#### 2.4.2 ÍNDICES DE FIABILIDADE BASEADOS NA CARGA

Os índices mais antigos, utilizados na medição da fiabilidade das redes de distribuição, ponderam os clientes baseados na carga ligada à rede, em vez de os considerarem todos iguais [9], [14]. A utilização deste tipo de índices deve-se ao facto de que no passado as empresa elétricas sabiam qual a potência dos seus transformadores, mas tinham pouco conhecimento relativamente ao número de clientes que estavam ligados a cada transformador. Devido à referida ponderação, os seguintes índices são referidos como baseados na carga.

##### *ASIFI - Average System Interruption Frequency Index*

Este índice foi especificamente criado para considerar a fiabilidade baseado não no número de clientes mas na carga. É um índice importante para áreas que servem predominantemente clientes industriais/comerciais. O índice  $ASIFI$  mede o número de

interrupções na rede, considerando a carga interrompida sobre a carga total fornecida. Matematicamente é representado pela seguinte equação:

$$ASIFI = \frac{\text{Carga interrompida}}{\text{Carga total fornecida}} = \frac{\sum L_i}{L_T} \quad (2-7)$$

onde:

- $L_i$  Carga afetada por um defeito no troço  $i$ ;
- $L_T$  Carga total servida pela rede;

#### ASIDI - Average System Interruption Duration Index

Este índice foi desenvolvido com a mesma filosofia do índice ASAFI, mas aqui fornece informação sobre a média de duração das interrupções do sistema. O índice ASIDI mede o número de interrupções na rede, considerando a carga interrompida sobre a carga total fornecida. De acordo com esta definição, é descrito pela seguinte expressão:

$$ASIDI = \frac{\text{Tempo interrupção da carga interrompida}}{\text{Carga total servida}} = \frac{\sum (t_i \times L_i)}{L_T} \quad (2-8)$$

onde:

- $t_i$  É o tempo médio de interrupção para o troço  $i$ ;
- $L_i$  Carga afetada por um defeito no troço  $i$ ;
- $L_T$  Carga total servida pela rede;

#### 2.4.3 ÍNDICES DE FIABILIDADE BASEADOS NA ENERGIA

Sob o ponto de vista comercial, um dos fatores de grande importância é a energia não distribuída. Neste contexto é bastante utilizado o índice Energia Não Distribuída (END).

### END - Energia Não Distribuída

O índice Energia Não Distribuída (END) mede a energia que não é distribuída aos clientes devido a uma interrupção na rede. Matematicamente é representado pela seguinte equação:

$$ENS = \sum_i (L_i \times t_i) \quad (2-9)$$

onde:

- $L_i$  Carga afetada por um defeito no troço  $i$ ;
- $t_i$  É o tempo médio de interrupção para o troço  $i$ ;

A razão pela qual os índices baseados na carga antecedem os índices baseados nos clientes é pragmática. No passado as empresas elétricas sabiam qual a potência dos transformadores na rede de distribuição, mas pouco sabiam sobre os consumidores ligados a cada transformador. Quando um equipamento de proteção era acionado, os transformadores interrompidos eram facilmente identificados. Por outro lado, para se saber quais os clientes interrompidos era necessário uma estimativa. Hoje em dia, os Sistemas de Informação de Clientes associam os clientes aos transformadores, o que permite facilmente determinar os índices baseados nos clientes. Da perspectiva da empresa elétrica, os índices ASIFI a ASIDI, provavelmente representam melhores medidas de fiabilidade da rede que os índices SAIDI e SAIFI, uma vez que a uma maior carga corresponde uma maior faturação. Deste modo, será mais fácil serem considerados nas decisões de investimento.

## 2.5 RISCOS ASSOCIADOS AOS ÍNDICES MAIS UTILIZADOS

Embora os índices mais utilizados traduzam de modo satisfatório a fiabilidade da rede, podem gerar alguns riscos na altura da tomada de decisões de investimento. Muitas vezes o investimento poderá não estar claramente alinhado com o interesse dos consumidores, especialmente em empresas onde já se verifica um historial de melhoramento da fiabilidade da rede. De seguida especificam-se alguns potenciais problemas associados

aos índices mais utilizados.

**SAIDI e SAIFI** – O investimento realizado no melhoramento da fiabilidade associado aos índices SAIFI e SAIDI, é proporcional ao número de clientes afetados. Isto significa que projetos que afetam mais clientes são preferidos aos que afetam menos clientes. Por si só, isto não é um problema. No entanto, considerando que as empresas já tendiam a canalizar os investimentos para zonas de rede com maior número de clientes, geralmente os alimentadores destas áreas já possuem maior fiabilidade que alimentadores de áreas com menor número de clientes. Assim, os investimentos baseados nestes dois índices poderão direcionar ainda mais os investimentos para áreas densamente povoadas, onde a fiabilidade já é satisfatória.

**CAIDI** – Embora bastante utilizado pelas empresas elétricas e pelas entidades reguladoras, este índice poderá ser bastante problemático. Muitos consideram que este índice é uma indicação da eficiência da empresa elétrica. Quando a empresa responde mais rapidamente a uma interrupção o índice baixa. No entanto, como o CAIDI é calculado com o SAIDI a dividir pelo SAIFI, se este melhorar mais rapidamente que o SAIDI, o CAIDI aumentará. Isto é, a fiabilidade poderá estar a melhorar quer no SAIDI quer no SAIFI, mas o CAIDI está a aumentar.

**MAIFI<sub>E</sub>** – Tal como o SAIDI e o SAIFI, este índice também tenderá a levar os investimentos para áreas mais densamente povoadas. Este índice também desencoraja investimentos na automatização da rede, porque resultarão em mais interrupções momentâneas. Para além disso, muitas vezes as empresas elétricas apenas utilizam as operações dos disjuntores nas subestações, não tendo a capacidade de considerar os dados referentes a outros equipamentos de proteção instalados na rede.

**Recolha de Dados:** Os índices de fiabilidade podem variar substancialmente de acordo com as práticas de recolha de dados de cada empresa elétrica. A recolha de dados manuais, tende a omitir uma parte significativa de interrupções e a considerar dados não fiáveis relativos ao número de eventos relativos à restauração e reconfiguração do sistema. Isto tem implicações no real valor dos índices. Um modo de ultrapassar esta

limitação consiste na instalação de sistemas automáticos de gestão de interrupções. Por outro lado as definições dos índices também podem complicar a comparação entre diversas empresas elétricas. Um bom exemplo é a definição de uma interrupção sustentada. Se uma empresa elétrica definir essa interrupção baseada nos 5 minutos, as operações automáticas dos equipamentos de proteção podem efetivamente reduzir o índice SAIFI, uma vez que a maior parte das operações de religação podem ser realizadas dentro deste intervalo temporal. Se outra empresa definir uma interrupção sustentada baseada no tempo de um minuto, a automatização da rede não conseguirá reduzir o SAIFI, uma vez que a maior das operações de religação levam mais do que este tempo.

## 2.6 FIABILIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS COM DISPOSITIVOS DE INTERRUPÇÃO

Uma parte importante dos sistemas de distribuição é planeada para operar com topologia radial. Estes sistemas radiais de distribuição possuem uma série de componentes entre a subestação e os pontos de carga, que incluem linhas, cabos, transformadores, disjuntores, interruptores e seccionadores para além de outros equipamentos. Um defeito em qualquer um destes equipamentos resulta num defeito para um ou mais pontos de carga. Os dispositivos de interrupção constituem um meio para isolar uma secção sob defeito do resto da rede. Alguns sistemas possuem uma alimentação alternativa para as secções que foram colocadas fora de serviço depois do defeito ser isolado. Normalmente as taxas de defeito nas linhas de redes de distribuição radiais, são aproximadamente proporcionais ao seu comprimento [15], [16]. Nos últimos anos, as tecnologias de automação em redes de distribuição de energia elétrica tornaram-se comuns, e uma das mais eficazes aplicações consiste na reconfiguração da rede após um defeito. Os dispositivos de interrupção desempenham um papel importante nessa reconfiguração e portanto na melhoria da fiabilidade nos sistemas de distribuição elétrica [17], [18]. A sua instalação na rede, reduz o tempo médio dos defeitos de interrupção sentido pelos clientes da rede assim como o número de clientes afetados. Conforme é possível verificar pela Figura 2-3, para uma rede sem qualquer dispositivo de interrupção, no caso de um defeito em qualquer parte da rede, todos os clientes serão afetados.



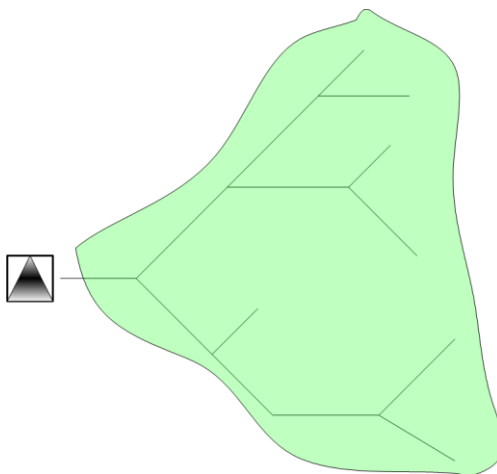


Figura 2-3: Rede distribuição sem dispositivos de interrupção.

Considerando a mesma rede agora com dois dispositivos de interrupção (Figura 2-4), em caso de defeito na área C, os clientes nas áreas A e B não são afetados. O mesmo se passa para um defeito na área B, onde os clientes das áreas A e C não serão afetados. Em caso de defeito na área A todos os clientes continuam a ser afetados. No caso da rede com dispositivos de interrupção verifica-se que é possível obter uma melhoria da fiabilidade da rede, uma vez que menos clientes serão afetados por um defeito, e ainda, que é possível obter uma duração média de defeitos menor.

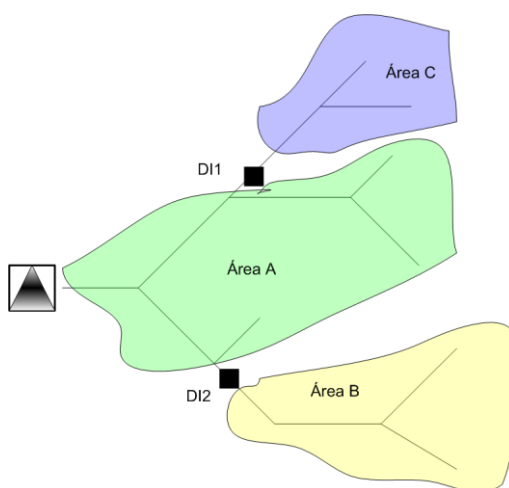


Figura 2-4: Rede distribuição com dois dispositivos de interrupção

Em geral, o problema de colocação de dispositivos de interrupção não pode ser otimamente solucionado sem considerar [19]:

- 1) A modelação adequada dos elementos da rede de distribuição e das cargas elétricas;
- 2) A composição das funções objetivo e suas restrições;
- 3) Os algoritmos de cálculo do problema de otimização;
- 4) A otimização e as técnicas de tomada de decisão, utilizadas para definirem a solução ideal.

Diferentes algoritmos foram utilizados por diversos autores para a colocação ótima de dispositivos de interrupção nas redes de distribuição elétrica, visando a melhoria de vários índices de fiabilidade e do custo dos equipamentos.

Em [20] foi proposta uma metodologia para a colocação ótima de equipamentos de seccionamento tendo em consideração uma função composta pelo custo das interrupções e do investimento e manutenção em equipamentos. Foi utilizada uma metodologia de otimização baseada no algoritmo *Simulated Annealing* para determinar o número de equipamentos de seccionamento e a sua localização na rede. A metodologia proposta oferece uma solução ótima para o problema colocação de dispositivos de seccionamento em função da fiabilidade e dos custos associados ao investimento e manutenção dos equipamentos.

O problema da colocação de dispositivos de proteção e interrupção na rede de média tensão foi formulado em [21] usando uma programação binária. Foi proposta uma metodologia para determinar o tipo e a localização de dispositivos de proteção na rede de distribuição, propondo um índice composto considerando, a coordenação de equipamentos assim como o desenho da rede, tendo em conta a minimização do índice de fiabilidade SAIFI.

Um algoritmo do tipo *Ant Colony System* é proposto em [22], para a recolocação de interruptores na rede. Aqui testa-se a aplicabilidade deste algoritmo para a colocação de interruptores nas redes de distribuição. Considera-se que a recolocação de equipamentos é uma solução útil uma vez que pode reduzir os custos de interrupção sem efetuar investimentos adicionais em equipamentos. Uma comparação deste algoritmo com um algoritmo genético foi também apresentada.

Foi utilizado em [23] um algoritmo imunológico para encontrar a melhor localização de interruptores através da minimização de uma função compreendendo o custo das

interrupções para os clientes e o custo dos equipamentos de interrupção. O custo das interrupções dos clientes baseou-se em índices de fiabilidade (SAIDI e SAIFI e ENF). Nesta abordagem considerou-se uma rede radial alimentada por duas subestações, tendo a localização dos interruptores considerado a possibilidade do balanceamento de carga entre as duas subestações. O algoritmo foi aplicado a uma rede real de TAIWAN, tendo-se verificado melhorias na deteção e isolamento das falhas e nas funções de restauração do sistema automático de distribuição.

Em [24] foi otimizada a localização de seccionadores na rede de distribuição tendo em conta o equilíbrio entre o custo de investimento em equipamentos e manutenção por parte das empresas elétricas e o custo das interrupções para os clientes. O custo para os clientes é calculado através de uma análise à fiabilidade do sistema, tendo em conta os índices SAIDI, SAIFI e ENF. Esta otimização mono objetivo foi realizada utilizando um algoritmo genético. A função objetivo minimizada, considera uma composição dos referidos custos.

A localização de dois tipos de dispositivos de interrupção (disjuntores e seccionadores) utilizando um algoritmo de otimização do tipo *Particle Swarm*, foi considerada em [25] para minimizar uma função objetivo ECOST correspondendo ao custo das interrupções para os clientes. Esta função considera a tipologia da rede, a duração das interrupções, as variações de carga e o tipo de cliente interrompido.

Uma abordagem baseada no algoritmo *Tabu Search* foi proposto em [26] para a colocação de dois tipos de dispositivos (controlo e de proteção) na rede de distribuição. Foi utilizada uma minimização mono objetivo para minimizar uma função que considera o custo dos equipamentos, o custo das interrupções sustentadas e o custo das interrupções momentâneas. Os custos têm em conta o tipo de dispositivo de interrupção (disjuntor, fusível e seccionador). Após um defeito, a rede é reconfigurada passando parte da rede a ser alimentada por outra subestação.

Em [27] é também proposto um algoritmo do tipo *Ant Colony System* para identificar o tipo (interruptores e disjuntores) e a localização de dispositivos de interrupção na rede. Foi utilizada uma otimização multiobjectivo, minimizando ao mesmo tempo os índices de fiabilidade SAIFI e SAIDI assim como o custo dos equipamentos e custo das interrupções. Após um defeito a rede é reconfigurada, sendo retirada parte da rede sob defeito. É considerado a alimentação através de diversos pontos de alimentação.

Na referência [28], é proposta uma metodologia baseada numa avaliação tipo *Fuzzy Logic* para determinar cenários ótimos de automatização da rede de distribuição. Os cenários são ordenados considerando uma avaliação multiobjectivo, minimizando-se as funções objetivo SAIDI, SAIFI e custo das interrupções, esta tendo em conta o tipo de cliente.

A colocação de interruptores na rede foi otimizada em [29]. O objetivo principal consistia em minimizar uma função objetivo que integra o custo de investimento em interruptores, o custo anual da operação e manutenção, o custo das interrupções para o cliente e o custo das perdas na linha. Foi considerado a alimentação a partir de duas subestações, podendo as cargas ser balanceadas conforme a zona de interrupção. Os índices de fiabilidade ASAI, e ENF serviram de restrição às soluções encontradas. Para a resolução do problema foi utilizado o algoritmo genético NSGA-II.

Foi considerado em [30] a colocação otimizada de interruptores na rede para melhorar o seu nível de fiabilidade. Um algoritmo do tipo *Fuzzy Logic*, foi utilizado para minimizar o índice de fiabilidade SAIDI sujeito à restrição de limite de investimento, isto é, do número máximo de interruptores a instalar na rede. A reconfiguração da rede é considerada, permitindo a alimentação a partir de diversas subestações.

Em [31] é proposto um algoritmo modificado do tipo *shuffled frog leaping* para a colocação de interruptores manuais e automáticos na rede. O primeiro objetivo considerado na minimização foi o custo das interrupções para o cliente, tendo em conta o tipo de consumidor e os padrões de consumo. O segundo foi o custo de investimento e manutenção em equipamentos de interrupção.

Um algoritmo genético do tipo NSGA-II, foi utilizado em [32] para otimizar a colocação de interruptores, tendo em conta a possibilidade de reconfiguração da rede após um defeito. As funções objetivo minimizadas foram os índices de fiabilidade SAIDI, SAIFI e o custo dos interruptores.

Na referência [33] é apresentada uma comparação entre a otimização com algoritmos genéticos (GA) e otimização tipo *Particle Swarm*, no problema de colocação de interruptores na rede de distribuição minimizando o índice de fiabilidade SAIDI e a ENF e o custo total dos equipamentos.

A colocação de disjuntores e interruptores numa rede de distribuição, considerando a minimização de uma função que engloba os custos do custo dos equipamentos e da ENF

ao longo de um determinado período de tempo, é considerada em [34]. Os custos foram atualizados para poderem ser comparadas diversas soluções. As soluções obtidas foram utilizadas para calcular os índices de fiabilidade SAIDI, SAIFI, ENF e MAIFI. Um algoritmo do tipo *Particle Swarm* aliado a uma simulação Monte Carlo é utilizado para minimizar a referida função objetivo.

## 2.7 FIABILIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS INTEGRANDO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Nos últimos anos tem-se assistido a um aumento da consciência internacional sobre as alterações climáticas e, conseqüentemente ao questionar dos impactos que a geração de eletricidade e o seu uso de energia têm sobre o meio ambiente. Neste contexto, algumas das opções consideradas potencialmente mais promissoras para fornecer uma fonte de energia mais segura, limpa e eficiente são a produção local de energia elétrica e uso local de fontes de energia renováveis. Para além de um aumento da consciência internacional sobre as alterações climáticas, também se tem verificado um enorme crescimento do uso de energia renovável na forma de geração distribuída GD nos sistemas de distribuição de eletricidade. Para maximizar o benefício de tal inclusão são fundamentais novas filosofias de redesenho de topologias do sistema de distribuição existente e melhor posicionamento da GD na rede e dos equipamentos de restauração após distúrbios no sistema. O tradicional modelo de geração de energia elétrica consiste num conjunto centralizado de centrais de geração que necessitam de redes de transmissão de MAT e redes de distribuição de AT, MT e BT para transmitir a potência desde a geração até aos pontos de consumo. A maior parte das centrais elétricas do sistema tradicional de geração utilizam combustíveis fósseis. No entanto as questões ambientais e o decréscimo das reservas de combustíveis fósseis colocam novos problemas à indústria de energia elétrica. A estabilização do crescimento da procura de energia nos países industrializados aliado à liberalização do setor elétrico levaram a uma nova situação onde a maior parte dos investimentos em novas centrais e na expansão da rede de transmissão são examinados com crescente ceticismo. Como resultado de todos estes fatores e da evolução das novas tecnologias de geração, emergiu uma mudança na indústria elétrica de geração da geração centralizada para um modelo diferente onde se consideram os recursos distribuídos de

geração [35]. Neste contexto a geração distribuída (GD) emergiu como uma solução promissora por várias razões. A GD está em consonância com as Diretivas Europeias que requerem uma atuação no lado da procura. A GD renovável melhora a eficiência, assegura o fornecimento de energias limpas e contribui para a utilização de novas tecnologias de geração sustentáveis. Para além disso, na maior parte dos países da EU, o setor de energia elétrica tem vindo a ser desregulado e tem havido um encorajamento do setor privado para investir no setor elétrico. O nível de desregulamentação afeta grandemente as possibilidades de penetração da geração distribuída na rede de distribuição. Ao mesmo tempo, o aumento da procura na capacidade de geração constitui uma força para desenvolver e instalar mais GD para acompanhar a procura de energia elétrica. No entanto existe um “*trade-off*” entre os benefícios da GD e os efeitos adversos para a rede de distribuição que atrasam e limitam uma penetração mais generalizada da GD na Europa. A presença da geração distribuída pode alterar a operação das redes de distribuição devido a um número significativo de impactos [36], [37], [38], alterando o modo habitual de operação, afetando os sistemas de proteção e a capacidade de eliminação de defeitos. No caso onde a potência da GD é muito maior que a procura local, especialmente em redes rurais de baixa densidade, é provável que se verifique um trânsito de potência bidirecional podendo exceder a capacidade térmica dos equipamentos. O nível de tensão no ponto de ligação pode aumentar, pelo que a regulação da tensão dentro dos limites especificados pode tornar-se uma tarefa difícil. Para além disso a ligação da GD pode aumentar os níveis de corrente de curto-circuito, podendo influenciar a estabilidade da rede durante condições transitórias de operação. Finalmente dependendo da potência da GD e da topologia da rede, a qualidade da energia e a fiabilidade da rede poderá ser afetada. Tal como referido anteriormente, os fatores de fiabilidade importantes para os consumidores são a frequência e a duração de interrupção. Por outro lado, a evolução das empresas elétricas para um mercado mais competitivo, leva-as a aumentar o preço dos seus serviços e a fiabilidade da rede, reduzindo ao mesmo tempo os custos de operação e manutenção de modo a fornecer aos seus clientes preços de energia mais baixos. Um modo de reduzir os custos acima referidos, está na instalação de geração distribuída na rede. Estas pequenas unidades de geração, que incluem as gerações convencionais e não convencionais (geradores a diesel, eólicas, entre outras) continuam a melhorar em termos de custo e eficiência, aproximando-se do desempenho das gerações tradicionais [36],

[37]. Estes projetos ajudam a diferir no tempo, os investimentos nas centrais de geração e nas redes de transmissão e distribuição, podendo ao mesmo tempo reduzir as perdas nas linhas. No entanto, a ligação deste tipo de geração nem sempre é fácil de se realizar. Os sistemas de distribuição não foram desenhados para incluir geração. Foram desenhados para um sentido de trânsito de potência, das centrais para os consumidores. A geração distribuída pode alterar a operação da rede de distribuição, senão for cuidadosamente aplicada. Para a otimização da GD nas redes de distribuição radiais, têm sido consideradas diferentes abordagens tais como a reconfiguração da rede, a otimização da colocação da GD na rede e o funcionamento em ilha para aumentar a fiabilidade da rede. O projeto de redes de distribuição também deve ser redefinido para maximizar a fiabilidade, considerando também a maximização do uso dessas fontes de energia distribuída [4]. A ótima colocação da GD na rede pode ser descrita do seguinte modo. Na Figura 2-5 apresenta-se uma rede de distribuição radial com dois pontos de ligação de geração distribuída.

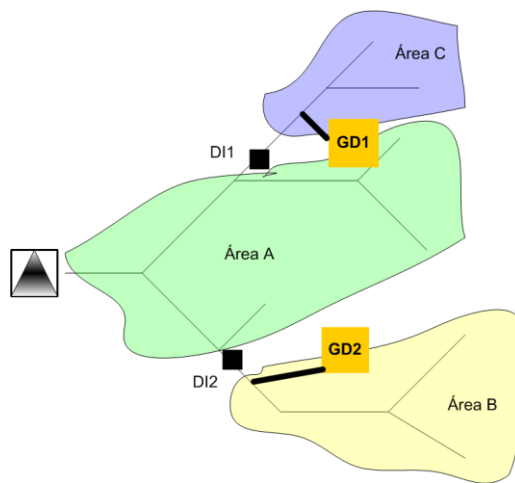


Figura 2-5: Rede distribuição com geração distribuída

Conforme é possível verificar através desta figura, em caso de defeito na área C, a GD1 fica fora da rede por ação do dispositivo de interrupção 1. Também a GD2 em caso de defeito na área B fica desconectada da rede. A fiabilidade da geração distribuída pode ser aumentada, para além de outros métodos, considerando a otimização da colocação da GD na rede. Esta otimização é exemplificada na Figura 2-6. Nesta nova situação a GD1 foi ligada à área A, não sendo agora afetada por interrupções na área C, aumentando assim

a sua fiabilidade. Face à Figura 2-5, verifica-se que a fiabilidade da GD, nomeadamente a da GD1, aumenta.

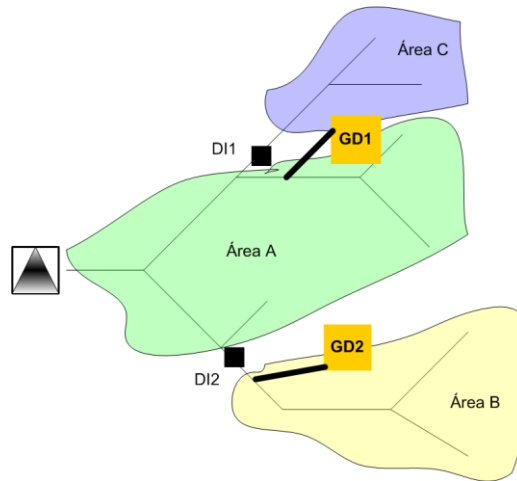


Figura 2-6: Aumento da fiabilidade da GD, através da otimização da ligação da GD à rede.

Uma das situações mais críticas relativamente à de rede de distribuição com geração distribuída é o funcionamento em ilha. Este tipo de funcionamento em muitos países não é permitido, uma vez que poderá causar problemas de segurança e sobretensões na rede. Por outro lado, poderá aumentar a fiabilidade da rede e o maior aproveitamento deste tipo de recursos. A operação em ilha e consequente aumento da fiabilidade da rede, por ser exemplificada considerando a Figura 2-7.

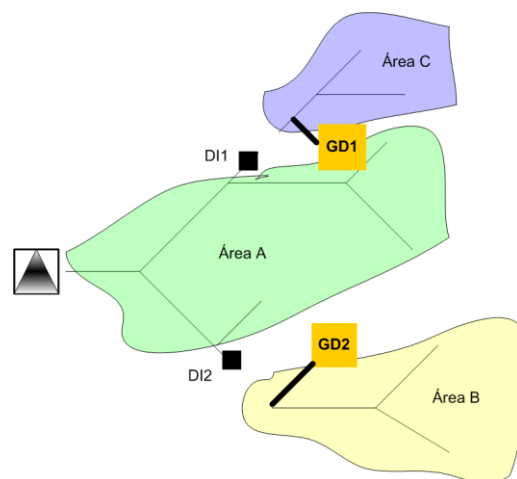


Figura 2-7: Aumento da fiabilidade da GD, através da reconfiguração da rede para o funcionamento da rede em ilha.



Nesta situação, no caso de se considerar um defeito na área A, as áreas B e C podem ficar a funcionar em ilha, alimentadas respetivamente pela GD2 e GD1. Deste modo, os clientes destas áreas B e C continuam a ser alimentados, reduzindo o número e o tempo das interrupções que os clientes ficam sujeitos, aumentando assim a fiabilidade da rede. Os trabalhos publicados têm considerado de um modo generalizado a determinação da ótima colocação da GD na rede, assim como do número ótimo e a potência da GD na rede. Nesta abordagem, as funções objetivo mais utilizadas foram a minimização das perdas, a energia não distribuída e o índice de fiabilidade SAIDI [39]. Na generalidade, nestes estudos, a fiabilidade da rede é aumentada permitindo a operação da rede em ilha. Diversos trabalhos consideram também a ótima colocação de dispositivos de interrupção na rede, para otimizar a operação da rede em ilha.

Os trabalhos que de seguida se descrevem, consideraram a ótima utilização da GD na rede, tendo em consideração a aplicação dos diversos modos de otimização atrás referidos.

Em [40] é otimizada a colocação e potência da GD na rede de distribuição utilizando um algoritmo genético. A potência da GD é calculada tendo em consideração a relação entre o custo de investimento, instalação e manutenção do gerador relativamente aos benefícios obtidos com a redução de perdas na rede. Por outro lado, ao permitir o funcionamento em ilha, é analisada a fiabilidade da rede relativamente aos índices SAIDI e SAIFI para a situação com e sem GD ligada à rede.

O melhoramento da fiabilidade em redes de distribuição é discutido em [41] considerando a operação intencional em ilha. Diversas configurações de rede são analisadas, admitindo a alimentação de parte dela apenas através da GD. Os resultados mostram que a fiabilidade da rede de distribuição é sensível a localização da GD na rede. As diversas configurações da rede são analisadas, calculando o índice de fiabilidade SAIDI e os custos das interrupções tendo em conta o tipo de cliente afetado. O cálculo deste custo baseia-se na energia não distribuída.

A colocação ótima de GD na rede de energia elétrica foi considerada em [42], utilizando uma programação dinâmica para minimizar o custo (investimento, instalação e manutenção), a ENF assim como as perdas na rede. Estes três objetivos são englobados numa única função objetivo que é minimizada para se obter a ótima localização da GD na rede.

Um algoritmo tipo *Fuzzy Logic* é usado em [43], para obter o número, a localização e a potência da GD na rede de distribuição. O algoritmo desenvolvido considera uma composição entre os índices de fiabilidade SAIDI, SAIFI, AENS e perfil de tensão. Considera também uma análise económica entre o tempo de recuperação do capital investido e o tempo de vida do projeto.

Em [44] é também utilizado um algoritmo genético para otimizar a colocação da GD na rede. Neste caso também foi utilizado um índice composto associado aos índices SAIDI, SAIFI, ENF e potência da geração distribuída. Cada um destes índices foram associados entre si, utilizando pesos de acordo com a importância relativa de cada um no total. A redução dos índices de fiabilidade é conseguida permitindo a utilização da GD para alimentar bolsas de clientes, após um defeito e posterior isolamento das partes sob defeito.

Uma metodologia de planeamento em redes contendo GD é apresentada em [45], tendo em conta os índices de fiabilidade SAIFI, SAIDI e END. O problema de otimização foi formulado considerando a obtenção de taxas de defeito e tempos de reparação, sujeitos a restrições baseadas nos referidos índices de fiabilidade. O algoritmo de otimização utilizado foi o *Particle Swarm*. Neste planeamento, é permitido a utilização dos geradores para alimentar partes da rede, que foram retiradas devido a um defeito, isto é, permitido um funcionamento de parte da rede em ilha para a redução dos índices de fiabilidade.

Uma otimização do planeamento de redes de distribuição baseada no algoritmo *Particle Swarm*, foi considerado em [46]. Neste trabalho adotou-se uma abordagem multiobjectivo, onde foram minimizados por um lado o custo dos equipamentos e sua instalação e por outro um fator de risco que considera um índice de perda de carga tendo em conta a sua variação sob diversas contingências e restrições. As variáveis consideradas foram o tipo de estrutura de rede (radial ou malhada), o número e o trajeto de troços na rede e ainda o número e localização de interruptores. O número, potência e localização da GD foi determinado numa segunda fase da otimização.

Uma visão geral do estado da arte dos modelos e métodos aplicados ao problema de colocação ótima de GD é apresentado na referência [39]. Neste estudo foram analisados 83 trabalhos, tendo sido considerado de um modo generalizado a colocação, o número, o tipo e a potência da GD na rede. As funções objetivo mais utilizadas para serem minimizadas por estes trabalhos foram a minimização das perdas, a energia não

distribuída e o índice de fiabilidade SAIDI.

São propostos em [47] dois índices compostos para avaliar o impacto da GD nos clientes e na geração. Cada um destes índices são uma composição dos índices SAIFI, SAIDI e ENF, sendo analisados sob o ponto de vista dos clientes e sob o ponto de vista da geração. São consideradas várias configurações da rede após um defeito, sendo permitido o funcionamento em ilha da rede, alimentado pela GD.

Em [48] foi proposto um planeamento de longo prazo para maximizar os benefícios da reconfiguração da rede e da colocação ótima da GD. Neste trabalho foram consideradas duas funções objetivo a serem minimizadas. Uma considera o custo associado à remodelação de linhas, o custo das perdas de energia, o custo das operações de reconfiguração e ainda o custo da GD (investimento, instalação e operação). A outra função objetivo considera a minimização dos gases de efeito de estufa considerando as emissões da rede e da GD. Para esta otimização foi utilizado o algoritmo genético NSGA-II.

A maximização da área da rede após um defeito e minimizando as perdas na rede foi considerado em [49]. Na otimização das topologias após um defeito, é considerado o modo ótimo de operação da GD na rede. Estas topologias permitem quer a operação da GD em redes com configuração radial, quer em operação em ilha. Um algoritmo genético foi utilizado para a otimização das topologias de rede, tendo em conta as possíveis reconfigurações da rede após um defeito.

O planeamento e expansão das redes de distribuição radiais com integração de geração distribuída foi otimizado em [50], utilizado um algoritmo híbrido do tipo *Simulated Annealing*. Neste trabalho foi proposto um índice composto que considera o custo de investimento na modernização da rede existente, o custo das perdas de energia, o custo das interrupções na ótica do cliente e o custo da perda de produção da GD.

Em [51] foi otimizada a colocação de geração fotovoltaica, eólica e sistemas de armazenamento de energia em redes de distribuição. O algoritmo genético NSGA-II foi utilizado para minimizar o custo de investimento, a ENF e a perdas na rede.

Em redes de distribuição de modo a otimizar a disponibilidade da geração distribuída, para além dos trabalhos em que se focalizou na colocação ótima da GD nas redes de distribuição, também são apresentadas outras abordagens relativamente ao aumento da fiabilidade. Neste contexto diversos trabalhos abordaram a otimização da colocação de

dispositivos de interrupção, considerando a operação da rede em ilha.

Na referência [52] é utilizado um algoritmo genético para a colocação otimizada de dispositivos de religação e seccionadores e da GD na rede, de modo a melhorar a fiabilidade da rede. É proposto um índice composto, considerando os índices SAIDI, SAIFI e MAIFI, para a colocação dos dispositivos de interrupção tendo em consideração o funcionamento em ilha da GD.

A possibilidade de melhorar a fiabilidade da rede através da operação intencional em ilha da rede, foi discutida em [41]. As funções objetivo consideradas foram o índice de fiabilidade SAIDI e o custo das interrupções tendo em conta o tipo de cliente afetado assim como a diferenciação dos custos no caso de interrupções planeadas e não planeadas. Diversas configurações de rede foram testadas considerando a alimentação de parte da rede de modo a funcionar intencionalmente em ilha.

Em [53] é otimizada a colocação de disjuntores (*reclosers*) na rede de distribuição para melhorar a fiabilidade da rede. É apresentado um índice composto como função objetivo a ser minimizado compreendendo uma composição dos índices SAIDI e SAIFI, cada um deles afetado por um peso de acordo com a sua importância no conjunto. Para a minimização do índice composto foi utilizado o algoritmo genético *Multiple-Population Genetic Algorithm* (MPGA). A fiabilidade da rede é aumentada considerando o funcionamento em ilha, utilizando deste modo a GD para alimentar parte dos clientes retirados da rede devido a um defeito.

Um algoritmo genético melhorado é proposto em [54] para a colocação de interruptores em redes de distribuição com GD. Neste trabalho o investimento em interruptores foi limitado, assim como o número de GD ligados à rede (máximo de 2). Foram testadas diversas configurações de rede, com e sem GD, de modo a minimizar o custo das interrupções. A criação intencional de zonas na rede a funcionar em ilha foram também consideradas.

Foi utilizado em [55] uma análise de risco para a colocação ótima de equipamentos de proteção na rede incorporando GD. A análise de risco minimiza o problema da atuação defeituosa das proteções devido à existência GD na rede. A operação em ilha é permitida e considerada na minimização do risco.

O algoritmo *Particle Swarm* para determinar a ótima localização de interruptores na rede tendo por objetivo o aumento a fiabilidade da rede, foi utilizado em [56]. A ótima

localização considera a minimização de um índice composto, que considera o custo dos equipamentos e a ENF. A variabilidade da geração distribuída, é também considerada em termos probabilísticos de modo a determinar potência disponível para alimentar áreas retiradas da rede após um defeito. Estas áreas serão então operadas em modo isolado ou em ilha.

A configuração da rede contendo GD é otimizada em [57], através da colocação de dispositivos de interrupção na rede. Foi utilizado um algoritmo do tipo *Particle Swarm* com o objetivo de otimizar o posicionamento de interruptores de modo a minimizar uma função objetivo que considera o custo dos equipamentos, da operação e manutenção assim como o custo das interrupções para cada tipo de cliente. Para além disso foi calculada a ENF para cada configuração de rede. A fiabilidade é aumentada considerando a operação da rede em ilha.

## 2.8 FIABILIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS CONSIDERANDO ÍNDICES DE FIABILIDADE PARA INTERRUPÇÕES DE CURTA DURAÇÃO

A reestruturação do setor elétrico que se tem efetuado um pouco por todo o mundo, com o estabelecimento de um conjunto de objetivos e padrões de qualidade para as empresas de distribuição e com uma cada vez maior penetração da GD ligada à rede de distribuição, elevou os requisitos para novas metodologias de planeamento para as redes de distribuição. O planeamento na rede de distribuição visa definir o plano de expansão e reforços necessários para enfrentar o natural aumento da procura de energia, da ligação de novos consumidores e da geração distribuída [58], [59], [60]. Para além disto, o objetivo do planeamento passa também pela minimização da soma do CAPEX (*Capital Expenditure*) e OPEX (*Operation Expenditure*) durante um determinado período de tempo. A solução para esta questão tem que ter em conta diversas restrições técnicas, por exemplo o perfil de tensão, a potência máxima de alimentação dos cabos e os diversos índices de fiabilidade impostos pelas entidades reguladoras (tempo máximo de interrupção e frequência máxima de interrupção ao longo de um ano).

Os sistemas de armazenamento, tradicionalmente bem conhecidos sob a forma de grandes sistemas de armazenamento hídricos, estão cada vez mais a ser considerados em sistemas de pequena e média escala. Esta expansão é complementar à expansão dos

recursos renováveis e da geração distribuída em geral ligada à rede de distribuição e representam uma nova área de oportunidades de negócio [61], [62], [63].

Através da possibilidade de equilibrar as flutuações da procura de energia, os sistemas de armazenamento de energia podem introduzir importantes benefícios em todo o sistema elétrico. Estes benefícios podem fazer-se sentir nos dois extremos da rede. Na parte da geração através da potencialidade de aumentar a eficiência dos geradores e nos consumidores com o aumento da qualidade da energia e na redução dos picos de carga. De fato, a colocação dos sistemas de armazenamento em zonas onde a rede de distribuição está próxima do limite de carga, pode significar trazer importantes benefícios económicos, através do deferimento de investimento em equipamentos como a adição de um transformador numa subestação ou no aumento de potência de uma linha. Se colocados em zonas críticas do sistema de distribuição, podem trazer benefícios em termos da compensação reativa e na estabilização da tensão. Por outro lado, podem evitar a compra de energia elétrica (mais cara) em horas de pico, assim como reduzir a exposição ao risco de mercado e reduzir as perdas na linha.

Sendo a qualidade da energia elétrica uma grande preocupação para as empresas distribuidoras e para os consumidores, a melhoria da fiabilidade das redes de distribuição são fatores primordiais para a melhoria desta qualidade. A maior parte das interrupções aos consumidores estão relacionadas com falhas na rede de distribuição [14]. Nos sistemas de distribuição, especialmente em redes aéreas, a maior parte dos defeitos ocorrem durante condições climáticas adversas como tempestades. Estas resultam em interrupções momentâneas ou sustentadas aos pontos de carga. Para as empresas elétricas de distribuição, as interrupções momentâneas estão cada vez mais a tornar-se uma grande preocupação, principalmente devido aos impactos sobre os novos tipos de cargas sensíveis. O aumento da sensibilidade destas cargas a interrupções momentâneas, têm forçado as empresas de distribuição a olhar com mais atenção para este tipo de interrupções. Estas interrupções podem causar perdas na produção nas empresas que necessitam de alimentação ininterrupta. Também para os consumidores residenciais, os computadores e dispositivos eletrónicos são usualmente sensíveis a interrupções momentâneas.

Os índices mais utilizados para medir as interrupções de curta duração nas redes elétricas, definidos na norma do IEEE 1366 [13], são os índices MAIFI (*Momentary*

*Average Interruption Frequency Index*) e MAIFI<sub>E</sub> (*Momentary Average Interruption Event Frequency Index*). Tendo em conta que as interrupções momentâneas são uma preocupação recente das empresas de energia elétrica, são escassos os trabalhos publicados que minimizam o índice MAIFI. Alguns utilizam a localização ótima de interruptores de dispositivos de proteção para esta minimização.

Em [64] é utilizado um algoritmo genético NSGA-II para minimizar uma função objetivo, que considera os índices de fiabilidade SAIDI, SAIFI e MAIFI<sub>E</sub>. Para esta otimização é determinado a localização de disjuntores e interruptores, considerando como restrições limitações técnicas (topologias de rede e coordenação de proteções) e económicas (limitação do número de equipamentos a serem instalados na rede). Neste trabalho foi considerada a reconfiguração da rede, com possibilidade de alimentação a partir de diversos pontos. Neste sentido, após um defeito, parte da rede é isolada, sendo a restante alimentada por outro ponto de alimentação.

Foi proposta em [65] a colocação de interruptores na rede usando uma programação tipo *Fuzzy Logic* para otimizar uma função objetivo que minimiza o custo das interrupções, o custo dos equipamentos e o custo da manutenção, sujeito a restrições ligadas aos índices de fiabilidade SAIDI, SAIFI, MAIFI e ENF. Estas restrições permitem incorporar aspetos regulatórios ligados a este tipo de índices de fiabilidade. Esta abordagem também foi considerada em [66] mas utilizando um algoritmo de otimização *Ant Colony*. Nestes trabalhos foram considerados esquemas de reconfiguração e atuação de disjuntores e interruptores após um defeito. As funções objetivo utilizadas no problema de minimização foram os índices SAIDI, SAIFI e MAIFI sujeitas a restrições técnicas e económicas.

Um algoritmo gravitacional foi utilizado em [67] para minimizar uma função objetivo para minimizar os problemas das cavas de tensão relacionados com problemas nos transformadores e nas linhas. Esta função é utilizada para a colocação na rede de compensadores estáticos DSTATCOM (*Distribution Static Synchronous Compensator*) para a redução de interrupções sustentadas e momentâneas na rede. Tendo em conta que o melhoramento das variações de tensão na rede traduz-se num melhoramento da fiabilidade, estes podem ser calculados para determinar os índices de fiabilidade ASIFI e MAIFI.

Os sistemas de armazenamento podem ser utilizados para reduzir as interrupções

momentâneas. Considere-se por exemplo a rede da Figura 2-8, com dois sistemas de armazenamento de energia. Conforme é possível verificar através da figura, quando existe um defeito na Área A, os dispositivos de interrupção DI1 e DI2 isolam as áreas B e C enquanto o dispositivo de proteção tenta eliminar o defeito. Durante este tempo, normalmente inferior a 3 minutos, os sistemas de armazenamento de energia SA2 e SA1 poderão alimentar as áreas B e C respetivamente, reduzindo assim o número de clientes afetados por uma interrupção de curta duração.

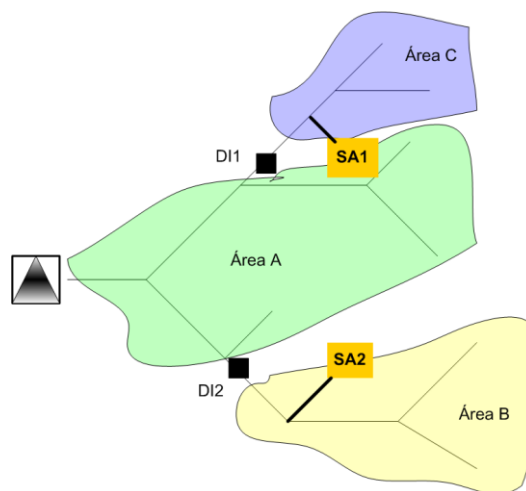


Figura 2-8: Rede de distribuição radial com dois sistemas de armazenamento.

A utilização de sistemas de armazenamento foi considerado em [68] para melhorar a gestão de energia e serviços auxiliares de redes em baixa tensão. Neste trabalho é analisado a utilidade dos equipamentos de armazenamento como solução para vários problemas de operação nas micro redes de energia elétrica de baixa tensão. A utilização de sistemas de armazenamento permitem essencialmente aumentar a fiabilidade das redes de energia elétrica relativamente às interrupções de curta duração, no entanto, em todos os trabalhos referidos anteriormente não foi abordado o impacto nos índices de fiabilidade. Apesar de não se terem identificado trabalhos que abordem a temática da integração dos sistemas de armazenamento de energia nas redes de distribuição para a melhoria da sua fiabilidade, prevê-se que no futuro este tipo de sistemas venham a desempenhar um papel relevante nas redes radiais de distribuição de energia elétrica [69], [70], [71].



## 2.9 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram abordados de forma resumida os diversos conceitos associados à fiabilidade das redes de distribuição de energia elétrica. A fiabilidade deste tipo de sistemas é normalmente medida com diversos índices de fiabilidade baseados nos clientes. Estes índices são também os utilizados pelas entidades reguladoras para estabelecer padrões mínimos de qualidade de serviço da rede, que as empresas elétricas tem que cumprir. Neste contexto foram apresentados os índices baseados nos clientes e os índices baseados na carga, mais utilizados pelas empresas de eletricidade. Os índices apresentados consideraram as interrupções sustentadas e as interrupções momentâneas. Para além disso, consideraram-se os potenciais problemas associados aos índices mais utilizados. A melhoria da fiabilidade das redes radiais de distribuição foi analisada considerando a colocação de dispositivos de interrupção. Deste modo apresentaram-se diversos trabalhos que abordam a otimização destes dispositivos tendo em consideração diversos fatores, como é o caso de alguns índices de fiabilidade e custo de investimento. Estes trabalhos recorreram a algoritmos de otimização, quer sob o ponto de vista mono objetivo, quer sob a forma de um problema multiobjectivo. Por outro lado, as preocupações com as emissões de gases de efeito de estufa tem vindo a fomentar largamente a introdução da geração distribuída na rede de distribuição. Esta grande disseminação da geração distribuída, por um lado pode afetar a fiabilidade da rede e por outro necessita dela própria de ser otimizada quanto à sua utilização. Neste âmbito foram abordadas as diversas possibilidades de aumentar a disponibilidade da geração distribuída, assim como o impacto destas na fiabilidade da rede. Também aqui, foram referenciados diversos trabalhos, que pela sua quantidade e diversidade, mostram a atualidade deste tema. Embora não sendo tradicionalmente consideradas pelas empresas elétricas, as interrupções de curta duração têm cada vez mais vindo a ser consideradas devido ao aumento na rede de equipamentos sensíveis a este tipo de interrupções. Neste sentido, para minimizar estas interrupções, foram aqui também abordados os sistemas de armazenamento de energia para a melhoria da fiabilidade da rede. Dado que é uma preocupação relativamente recente, o número de trabalhos publicados é reduzido, no entanto tem-se verificado um aumento de trabalhos publicados, evidenciando a atualidade deste tema para as empresas de distribuição elétrica.



## **Planeamento Multiobjectivo em Redes Distribuição Radiais integrando Dispositivos de Interrupção**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

O planeamento e operação em sistemas de distribuição tem como objetivo satisfazer a procura de energia por parte dos consumidores o mais economicamente possível, assegurando ao mesmo tempo a continuidade de serviço e os níveis de qualidade. Normalmente a abordagem que as empresas elétricas públicas tendem a adotar consiste no desenho e operação da infraestrutura da rede de energia elétrica de distribuição de forma a minimizar o seu custo total. Geralmente esta abordagem é referida como o planeamento baseado no valor. Por outro lado, as empresas elétricas privadas tendem a diferir no tempo os seus investimentos na rede para maximizar o retorno dos capitais. O seu objetivo consiste em satisfazer as necessidades de energia elétrica a um preço razoável. Tendências recentes mostram no entanto, que o foco futuro não estará apenas no desempenho económico mas antes na combinação entre a performance da empresa e o impacto do negócio tendo em consideração o bem-estar social e o meio ambiente (Figura 2-1).

O envelhecimento de infraestruturas e a fiabilidade são as questões que mais preocupam os gestores das empresas elétricas, estando estas intimamente relacionadas. Uma diminuição no investimento em infraestruturas diminui com o tempo a fiabilidade da rede, e vice-versa. As consequências de uma interrupção na alimentação de energia

elétrica vão muito além do inconveniente da própria interrupção em si. Uma interrupção pode custar às empresas milhares de euros em perdas de produção, de vendas e de informação. Assim, o custo económico das interrupções vão muito além da perda de produtividade. Neste contexto a colocação ótima de dispositivos de interrupção nas redes de distribuição, é uma das áreas que contribui para o objetivo das empresas operarem na zona de bem-estar social. Ao escolher a localização, o número e o tipo de dispositivos de interrupção na rede de distribuição, é possível maximizar o quociente entre os benefícios para a comunidade e os investimentos realizados pelas empresas elétricas na rede de distribuição.

Neste capítulo será abordado o problema da localização e tipo de dispositivos de interrupção em redes de distribuição radiais, tendo em consideração os índices de fiabilidade normalmente adotados pelas entidades reguladoras, como sejam os índices SAIDI e SAIFI, assim como o investimento necessário em dispositivos de interrupção. Nesta abordagem, será proposta uma otimização do tipo multiobjectivo, onde se pretende otimizar funções objetivo de carácter conflituoso. Neste âmbito, inicialmente apresenta-se a formulação para um planeamento multiobjectivo de redes de distribuição radiais, tendo em consideração a localização e tipo de dispositivos de interrupção, para o aumento da fiabilidade destas redes assim como a minimização dos custos de investimento. Para a resolução deste problema, serão apresentados algoritmos de otimização do tipo evolutivo. Serão também apresentados resultados obtidos a partir das metodologias propostas aplicadas a uma rede de distribuição real, do tipo radial.

### 3.2 FIABILIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS COM INTEGRAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE INTERRUPÇÃO

Atualmente a satisfação dos clientes relacionada com a fiabilidade do fornecimento de energia elétrica, tornou-se uma questão central nos novos mercados elétricos desregulamentados. Uma preocupação comum quer dos consumidores quer das empresas são o custo das interrupções. A magnitude destes custos depende da duração e da frequência das interrupções, assim como, do tipo de clientes afetados. Um dos fatores mais importantes que permite a atenuação deste problema consiste no melhoramento da fiabilidade das redes elétricas. Os padrões de fiabilidade das redes elétricas são

tradicionalmente estabelecidas como um conjunto de requisitos técnicos, a serem cumpridos durante o planeamento e operação [72]. Uma das áreas onde a fiabilidade tem aumentado de importância é a área de distribuição de energia elétrica. De fato, a maior parte das interrupções aos clientes estão relacionadas com defeitos na rede de distribuição [14]. Em termos de configuração de redes ao nível da distribuição, as topologias normalmente adotadas são as do tipo radial e anel. As redes radiais possuem uma configuração do tipo arborescente, com o trânsito de potência sempre com o mesmo sentido, da alimentação (subestação) até aos consumidores. As redes em anel são abertas num ponto da rede, que pode mudar com a alteração de topologia da rede (devido a uma interrupção). As redes de distribuição radiais, devido à sua configuração, são mais vulneráveis a interrupções com implicações para um número maior de clientes. Com este tipo de topologia, mesmo um único defeito pode afetar muitos consumidores. Deste modo, a redução do número e do tempo das interrupções é uma questão importante nos sistemas de distribuição elétricos do tipo radial.

Um dos modos de melhorar a fiabilidade nas redes de distribuição consiste na colocação de dispositivos de interrupção na rede [20], [73]. Estes equipamentos podem ser utilizados em dois modos diferentes para melhorar a fiabilidade da rede. Um deles consiste na utilização dos dispositivos de interrupção após a ocorrência de um defeito, de modo a reconfigurar a rede para que os clientes a jusante possam ser alimentados por outro ponto de alimentação [74], [75]. O outro modo, consiste em isolar a área sob defeito e restabelecer a alimentação aos clientes a montante. Ambos os modos aumentam a fiabilidade da rede ao reduzirem o tempo de defeito que um cliente experimenta.

No entanto a colocação destes equipamentos aumenta o investimento na rede. Deste modo, um dos modos de maximizar a fiabilidade e minimizar o investimento consiste em otimizar a colocação de dispositivos de interrupção na rede (Figura 3-1). Esta otimização pode ser obtida através da otimização do número, localização e tipo de dispositivos de interrupção na rede. Aumentando o número de equipamentos, pode-se em última análise retirar apenas o troço sob defeito e todos os restantes a jusante, reduzindo assim o número de clientes afetados por esse defeito.

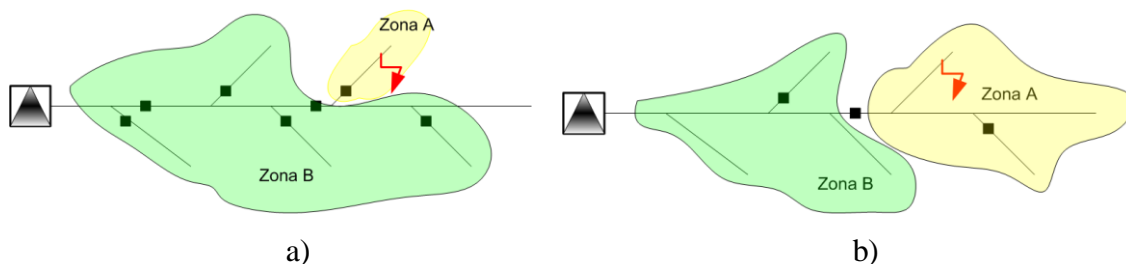


Figura 3-1: Efeito do número de dispositivos de interrupção sobre o número de clientes afetados.

No entanto o investimento em equipamentos é bastante mais elevado para o exemplo a) da Figura 3-1 onde existe uma maior fiabilidade, do que para a segunda situação b) da Figura 3-1 onde a fiabilidade é menor.

Analisando a rede sob o ponto de vista de um número constante de dispositivos de interrupção (mesmo investimento em equipamentos), é possível verificar que quando melhor for a sua localização na rede, tendo em conta as zonas de maior defeito na rede, melhor será a fiabilidade obtida. Ao otimizar a localização dos dispositivos de interrupção, pode-se afetar um menor número de clientes como se pode verificar pela situação a) da Figura 3-2.

Pelo contrário, na situação b) da mesma figura, onde a localização dos dispositivos de interrupção não está otimizada, quando se verifica um defeito afeta muito mais clientes do que na anterior situação.

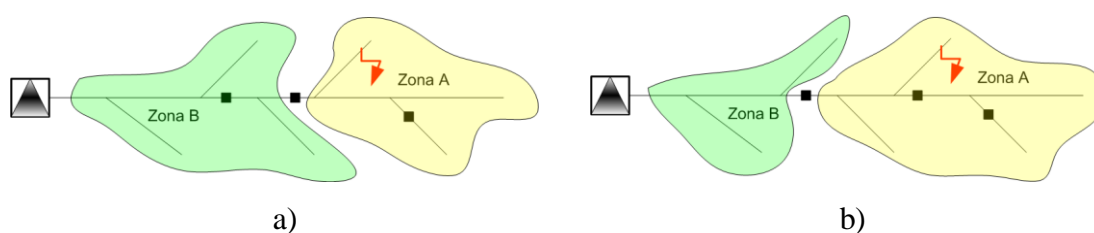


Figura 3-2: Efeito da localização dos dispositivos de interrupção na otimização de isolamento de defeitos e no número de clientes afetados.

Por fim, o tipo de dispositivos de interrupção utilizado para seccionar a rede, também tem impacto no tempo de interrupção sentido pelos consumidores. Considerando por exemplo a possibilidade de telecomando, a reposição de serviço nos troços com este tipo de equipamento é menor do que troços com equipamentos sem esta característica, uma vez que é necessário uma deslocação ao local para colocar o dispositivo em serviço. Neste

trabalho foram considerados interruptores e disjuntores, assim como se entrou em consideração com o custo destes equipamentos [76]. Os interruptores não possuem funções de proteção nem possibilidade de comunicação. O disjuntor possui funções de proteção e possibilidade de comando à distância. Os interruptores são mais económicos que os disjuntores, mas os últimos para além de outras funções, permitem a redução do tempo de restauração do defeito.

### 3.3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Conforme foi referido, a utilização de dispositivos de interrupção melhora a fiabilidade na rede de distribuição, através da separação da parte sob defeito do resto da rede. As definições dos diversos índices de fiabilidade normalmente utilizados pelas empresas elétricas são descritas na norma 1366 do (IEEE) [11]. Para interrupções de longa duração, esta norma recomenda entre outros, os índices SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) e SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*). As definições matemáticas destes índices foram apresentadas no capítulo anterior, nomeadamente nas equações (2-1) e (2-2). Estes dois índices são os mais utilizados pelas empresas elétricas e entidades reguladoras. Tendo em consideração este facto, neste trabalho adotou-se uma abordagem de otimização multiobjectivo, onde serão minimizados os índices SAIDI, SAIFI e CE (Custo dos Equipamentos) [77]. No caso concreto deste problema, é necessário desenvolver um índice onde estejam integradas as variáveis de decisão. Por sua vez, estas variáveis estão relacionadas com os dispositivos de interrupção que deverão ser instalados no princípio de cada secção. Assim, de acordo com o problema, as variáveis de decisão são o tipo de dispositivo de interrupção e a sua localização na rede de distribuição, pelo que estas variáveis são definidas por:

$$\lambda_i = \begin{cases} 1, & \text{se um interruptor for colocado na secção } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3-1)$$

$$\gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{se um disjuntor for colocado na secção } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3-2)$$

$$\beta_i = \begin{cases} 1, & \text{se nenhum DI for colocado na secção } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3-3)$$

De referir que estas variáveis de decisão serão integradas nas funções objetivo a definir e nos algoritmos de otimização que serão propostos.

### 3.3.1 FUNÇÃO OBJETIVO - SAIDI

Como primeira função objetivo a minimizar, foi considerado o índice de fiabilidade SAIDI tal como foi definido na equação (2-1). Esta função representa o tempo médio de interrupção que cada consumidor experimenta num determinado período de tempo, normalmente de um ano. Usualmente esta é medida em minutos ou horas de duração de interrupção ao cliente. No entanto, de modo a formular o problema, as variáveis de decisão definidas pelas equações (3-1), (3-2), (3-3), têm que ser integradas no índice de fiabilidade SAIDI. Assim, o modelo matemático para o problema de otimização poderá ser formulado de acordo com a seguinte equação:

$$\min \frac{\sum_i ((\lambda_i \times t_{Si} \times N_i) + (\gamma_i \times t_{Ri} \times N_i) + (\beta_i \times t_{Ni} \times N_i))}{N_t} \quad (3-4)$$

onde:

$t_{Si}$  É o tempo médio de interrupção na secção  $i$ , com um interruptor a afetar a secção  $i$ ;

$t_{Ri}$  É o tempo médio de interrupção na secção  $i$ , com um disjuntor a afetar a secção  $i$ ;

$t_{Ni}$  É o tempo médio de interrupção na secção  $i$ , sem um dispositivo de interrupção a afetar a secção  $i$ ;

$N_i$  É o número de consumidores afetados por uma interrupção na secção  $i$ ;

$N_t$  É o número total de consumidores na rede.



### 3.3.2 FUNÇÃO OBJETIVO - SAIFI

Como segunda função objetivo a minimizar, foi considerado o índice de fiabilidade SAIFI adaptado ao problema em causa, para considerar os diversos tipos de dispositivos de interrupção. Esta função representa o número médio de interrupções que cada consumidor experimenta num determinado período de tempo, normalmente de um ano. Tal como na função objetivo anterior, as variáveis de decisão foram integradas na formulação do problema considerando as equações (3-1), (3-2), (3-3). De acordo com este facto, o seguinte modelo matemático foi adotado para a segunda função objetivo:

$$\min \frac{\sum_i ((\lambda_i \times f_i \times N_i) + (\gamma_i \times f_i \times N_i) + (\beta_i \times f_i \times N_i))}{N_t} \quad (3-5)$$

onde:

$f_i$  É a frequência média de defeitos para a secção  $i$ ;

$N_i$  É o número de consumidores afetados por uma interrupção na secção  $i$ ;

$N_t$  É o número total de consumidores na rede;

### 3.3.3 FUNÇÃO OBJETIVO – CE (CUSTO EQUIPAMENTO)

O custo dos dispositivos de interrupção foi utilizado como a terceira função objetivo, que neste caso representa o investimento da empresa de distribuição para melhorar a fiabilidade da rede. Está relacionado com o investimento de capital e custos de instalação, diferenciados para os dois tipos de dispositivos de interrupção considerados. Deste modo, tendo em consideração as variáveis de decisão, esta função objetivo é formulada pela seguinte condição:

$$\min \sum_i ((\lambda_i \times C_{Si}) + (\gamma_i \times C_{Ri})) \quad (3-6)$$

Onde:

$C_{Si}$  É o custo de um interruptor instalado na secção  $i$ ;

$C_{Ri}$  É o custo de um disjuntor instalado na secção  $i$ ;

Analisando as três funções objetivo, é possível verificar que a terceira função é claramente conflituosa com as duas primeiras, uma vez que o aumento da fiabilidade da rede implica maior custo em equipamento e vice-versa.

### 3.4 ALGORITMOS PARA A OTIMIZAÇÃO MULTIOBJECTIVO

Múltiplos objetivos e muitas vezes conflituosos entre si surgem naturalmente na maior parte dos problemas de otimização do “mundo-real”. Dado que os algoritmos evolutivos possuem diversas características que são desejáveis para este tipo de problemas, estas estratégias têm sido utilizadas na otimização multiobjectivo há mais de uma década. Tal como na maioria dos problemas em engenharia, também o problema da fiabilidade em redes de distribuição tem objetivos conflituosos, como a minimização do custo dos equipamentos e o aumento da fiabilidade da rede. Para a resolução deste tipo de problemas, os algoritmos genéticos e evolutivos estão particularmente bem adaptados, utilizando funções especializadas de adaptabilidade (*atribuição de Aptidão*) e introduzindo métodos para promover a diversidade e o elitismo de soluções [78].

A colocação de dispositivos de interrupção na rede é um problema de otimização discreto com um grande espaço de soluções. Este tipo de problemas são extremamente difíceis de solucionar utilizando uma abordagem analítica, uma vez que não existe uma expressão que relacione o número, a localização e o tipo de equipamento com os índices de fiabilidade e com o custo total dos equipamentos. Atendendo a este fato, neste trabalho adotou-se uma abordagem de otimização multiobjectivo através do desenvolvimento de algoritmos do tipo evolutivo.

### 3.4.1 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJECTIVO

Um problema de otimização multiobjectivo pode ser definido do seguinte modo: dado um vetor  $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$  de variáveis de decisão *n-dimensional*, no espaço de soluções  $\mathbf{X}$ , será determinado um vetor  $\mathbf{x}^*$  que minimiza um dado conjunto  $K$  de funções objetivo  $z(\mathbf{x}^*) = \{z_1(\mathbf{x}^*), \dots, z_k(\mathbf{x}^*)\}$ . O espaço de soluções  $\mathbf{X}$  é geralmente restringido por um conjunto de restrições. Em problemas de otimização com múltiplos objetivos conflituosos entre si, a minimização de  $\mathbf{x}$  relativamente a uma função objetivo, frequentemente resulta em valores inaceitáveis para as outras funções objetivo. Deste modo, uma solução perfeita multiobjectivo que simultaneamente otimiza cada função objetivo é praticamente impossível. Uma solução razoável para um problema de otimização multiobjectivo consiste em determinar um conjunto de soluções, em que cada uma satisfaz as funções objetivo a um determinado nível sem ser dominada por qualquer outra solução. Se todas as funções objetivo forem consideradas para minimização, uma solução viável  $\mathbf{x}$  diz-se que domina outra solução viável  $\mathbf{y}$ , se e só se,  $z_i(\mathbf{x}) \leq z_i(\mathbf{y})$  para  $i = 1, \dots, K$  e  $z_j(\mathbf{x}) < z_j(\mathbf{y})$  para pelo menos uma função objetivo  $j$ . Assim, para um problema de minimização de várias funções objetivo, a determinação de um vetor  $\mathbf{x}^*$  deverá ser efetuado de modo a satisfazer a Equação (3-7).

$$\begin{aligned} \min \quad & z(\mathbf{x}^*) = \{z_1(\mathbf{x}^*), \dots, z_k(\mathbf{x}^*)\} \\ \text{st.} \quad & \mathbf{x} \in \mathbf{X} \\ & \mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_n\} \end{aligned} \tag{3-7}$$

Onde  $z_1(\mathbf{x}^*), \dots, z_k(\mathbf{x}^*)$  são os  $k$  parâmetros de otimização e  $\mathbf{x}$  é o espaço de soluções.

Existem duas abordagens genéricas à otimização multiobjectivo. A primeira consiste em combinar as funções objetivo individuais numa única função objetivo composta. A determinação de um único objetivo é possível com métodos como a teoria da utilidade ou o método dos pesos. Mas o problema mantém-se na correta seleção dos pesos ou das funções de utilidade para caraterizar as preferências do decisor. Na prática pode ser muito difícil a escolha dos pesos e funções mesmo para pessoas familiarizadas com o problema. A segunda abordagem consiste na determinação do conjunto de soluções ótimas de Pareto

ou um subconjunto representativo. No conceito de dominância de Pareto, um vetor objetivo  $\mathbf{y}^1$  diz-se que domina outro vetor objetivo  $\mathbf{y}^2$ , se nenhuma componente de  $\mathbf{y}^1$  é menor que a correspondente componente em  $\mathbf{y}^2$  e pelo menos um componente é maior. Deste modo, podemos dizer que uma solução  $\mathbf{x}^1$  é melhor que uma outra solução  $\mathbf{x}^2$ , isto é, que  $\mathbf{x}^1$  domina  $\mathbf{x}^2$ , se  $\mathbf{f}(\mathbf{x}^1)$  dominar  $\mathbf{f}(\mathbf{x}^2)$ . Por outras palavras, podem existir diferentes soluções ótimas que representam diferentes “*trade-offs*” relativamente às diversas funções objetivo. Uma solução diz-se ótima de Pareto se não for dominada por qualquer outra solução do espaço de soluções. Uma solução ótima de Pareto não pode ser melhorada relativamente a um determinado objetivo sem piorar pelo menos um outro objetivo. Na movimentação de uma solução de Pareto para outra, existe sempre um determinado sacrifício relativamente a um objetivo para se ganhar noutro objetivo. O conjunto de todas as soluções possíveis não-dominadas em  $\mathbf{X}$ , é referido como conjunto ótimo de Pareto. Para um conjunto ótimo de Pareto, o valor correspondente das funções objetivo é chamado fronteira de Pareto (Figura 3-3).

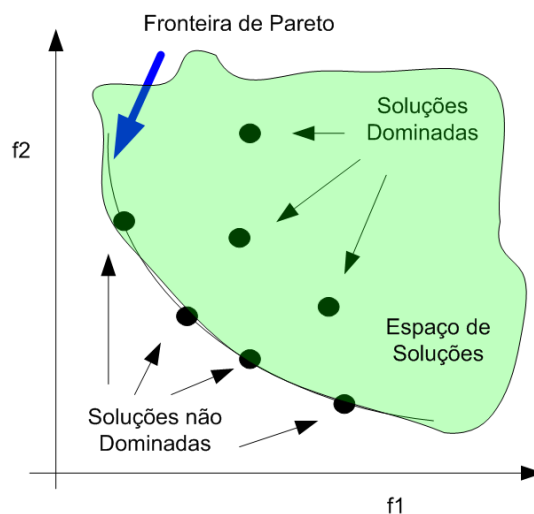


Figura 3-3: Fronteira de Pareto

Neste contexto, o objetivo de uma minimização multiobjectivo consiste em identificar as soluções do conjunto ótimo de Pareto. No entanto, identificar todo o conjunto de soluções ótimas de Pareto, para muitos problemas é praticamente impossível devido ao seu tamanho [79]. Assim, uma abordagem mais prática ao problema de otimização, consiste em determinar um conjunto de soluções (*o melhor conjunto de soluções*

*conhecidas de Pareto*) que representam o conjunto ótimo de Pareto o mais aproximadamente possível. Tendo isto em atenção, uma abordagem de otimização multiobjectivo deverá considerar os seguintes objetivos [79]:

1. A melhor fronteira de Pareto conhecida deverá estar o mais próxima possível da verdadeira fronteira de Pareto. Idealmente a melhor fronteira de Pareto conhecida, deveria ser um subconjunto ótimo de Pareto;
2. As soluções da melhor fronteira de Pareto conhecida devem estar uniformemente distribuídas pela fronteira de Pareto de modo a permitir ao decisor uma diversidade de “*trade-offs*”;
3. A melhor fronteira de Pareto conhecida deverá cobrir todo o espectro da fronteira de Pareto. Isto requer a investigação dos extremos do espaço de soluções da função objetivo.

O conjunto de soluções de Pareto são frequentemente preferíveis a uma única solução para os problemas na vida real, uma vez que a decisão final do decisor está sempre num equilíbrio entre vários parâmetros cruciais.

#### 3.4.2 ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTIOBJECTIVO

O termo de algoritmo evolucionário (AE) relaciona-se com uma classe de métodos estocásticos que simulam o processo de evolução natural. De acordo com a referência [80], as principais características de um sistema evolutivo são:

- ✓ A população ou populações de indivíduos concorrem por recursos limitados;
- ✓ A aptidão, que reflete a habilidade do indivíduo para sobreviver e reproduzir-se;
- ✓ A noção de mudanças dinâmicas nas populações devido ao nascimento e morte dos indivíduos;
- ✓ Os conceitos de variabilidade e hereditariedade ou seja, os novos indivíduos possuem muitas das características de seus pais, embora não sejam idênticos.

A origem dos AE remontam ao fim dos anos 50 e desde os anos 70, que diversas metodologias evolucionárias têm sido propostas, essencialmente algoritmos genéticos, programação evolucionária e estratégias evolucionárias [81]. Todas estas abordagens

operam sobre um conjunto de soluções possíveis para o problema. Utilizando uma grande simplificação, este conjunto de soluções é subsequentemente modificado através de dois princípios básicos: seleção e recombinação. Enquanto a seleção replica a competição pela reprodução e pelos recursos entre os seres vivos, o outro princípio, a recombinação, imita a capacidade natural de criação de novos seres vivos, através da recombinação e da mutação. Embora o mecanismo subjacente seja simples, estes algoritmos têm provado que são mecanismos de procura potentes, genéricos e robustos [81]. Em particular possuem algumas características desejáveis para a resolução de problemas envolvendo múltiplos objetivos conflituosos com grandes e complexos espaços de soluções. Os algoritmos evolucionários são caracterizados por possuírem as seguintes características [82]:

1. Mantêm um conjunto de soluções,
2. São realizados processos de seleção para acasalamento neste conjunto de soluções,
3. Diversas soluções podem ser combinadas em termos de recombinação para gerar novas soluções.

Em analogia com a evolução natural, as soluções candidatas são chamadas de *indivíduos* ou *cromossomas* e o conjunto de soluções candidatas é chamado de *população*. Cada indivíduo representa uma solução possível, isto é, um vetor de decisão para o problema em causa. No entanto, um indivíduo não é um vetor de decisão, mas sim uma codificação das variáveis de decisão. O processo de seleção dos indivíduos que vão gerar a geração seguinte, usualmente consiste em duas fases: o cálculo da aptidão e acasalamento. Na primeira fase, os indivíduos da população atual são avaliados no espaço de soluções e são-lhe atribuídos um valor escalar, a *aptidão*, que reflete a sua qualidade. Na segunda fase, é criado um conjunto de acasalamento, através de uma escolha aleatória de indivíduos na população de acordo com o seu valor de aptidão. Por exemplo, um processo usual de acasalamento é a seleção por torneio. Aqui, dois indivíduos são escolhidos aleatoriamente da população, e o indivíduo com a melhor aptidão é copiado para o conjunto de acasalamento. Este procedimento é repetido até à área de acasalamento estar completa. Depois, os operadores de recombinação e mutação são aplicados ao conjunto de acasalamento. O operador de recombinação toma um determinado número

de *pais* e cria um número pré-definido de *filhos*. Para imitar o processo de evolução natural, é definida uma probabilidade de recombinação a este operador. Por contraste, o operador de mutação modifica os indivíduos alterando pequenas partes nos vetores associados, de acordo com uma taxa de mutação pré estabelecida. De salientar que determinados indivíduos podem não ser afetados, devido ao efeito da aleatoriedade, e que são apenas uma cópia da solução anteriormente gerada. Finalmente, através de um processo de seleção são determinados quais os indivíduos da população e do conjunto modificado de acasalamento, que farão parte da próxima população. Baseado nos conceitos acima referidos, o processo de evolução natural é simulado por um processo computacional.

### 3.4.3 MEDIDAS DE DESEMPENHO

No caso da otimização multiobjectivo, medir o desempenho é mais complexo comparativamente à otimização com um único objetivo [83]. Na otimização multiobjectivo procura-se encontrar soluções o mais perto possível da ótima fronteira de Pareto, assim como obter uma maior diversidade de soluções.

#### PRESERVAÇÃO DE DIVERSIDADE

A maior parte dos algoritmos evolutivos de otimização multiobjectivo (AEOM), estes mantêm a diversidade dentro do conjunto de Pareto atual, através da incorporação de informação no processo de seleção: a probabilidade de seleção de um indivíduo decresce com a maior densidade de indivíduos na sua proximidade. As funções de Kernel [84] definem a vizinhança de um ponto em termos da chamada função de Kernel K que considera a distância a um ponto como argumento. Na prática, para cada indivíduo é calculada a distância  $d_i$  para todos os outros indivíduos  $i$ . Após a aplicação de K, os valores resultantes  $K(d_i)$  são somados. A soma dos valores das funções K representa a densidade da área onde está inserido cada indivíduo.

#### ELITISMO

O modelo de seleção elitista é normalmente aplicado juntamente com outros métodos de seleção, na tentativa de se aumentar a velocidade de convergência do algoritmo. O

elitismo relaciona-se com o problema de perder boas soluções durante o processo de otimização. Um modo de combater este problema consiste em juntar a população de pais com a população de filhos e aplicar um procedimento de seleção determinístico em vez de substituir a população atual pela população de filhos. Deste modo não são perdidas boas soluções da população de “pais”.

### 3.5 O ALGORITMO GENÉTICO EVOLUTIVO NSGA-II (FAST NON-DOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM)

O conceito de algoritmo genético (AG) desenvolvido no fim dos anos setenta por Holland [85] foi inspirado na teoria evolucionista que explica a origem das espécies. Na natureza, as espécies fracas e não adaptadas ao meio ambiente enfrentam a extinção por seleção natural. Os mais fortes têm maior probabilidade de passar os seus genes às gerações futuras via reprodução. A longo prazo, as espécies com a correta combinação de genes tornam-se dominantes na população. Por vezes durante o processo de evolução, mudanças fortuitas podem ocorrer nos genes. Se estas mudanças oferecerem vantagens adicionais na luta pela sobrevivência, novas espécies evoluem a partir das antigas. Mudanças sem vantagens serão eliminadas pela seleção natural. Na terminologia dos AG, um vetor solução  $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$  é chamado de indivíduo ou cromossoma. Os cromossomas são constituídos por elementos discretos chamados genes. Normalmente um cromossoma corresponde a uma solução única  $\mathbf{x}$  no espaço de soluções  $\mathbf{X}$ . Isto requer um mecanismo de mapeamento entre o espaço de soluções e os cromossomas. Este mapeamento é chamado de codificação. Os AG trabalham sobre a codificação de um problema e não sobre o problema em si. Estes algoritmos utilizam um conjunto de cromossomas, chamados de *população*, que no início é aleatoriamente inicializada. Para gerar novas soluções a partir das anteriores, os AG utilizam dois operadores: recombinação e mutação. O operador recombinação (processo de combinação de dois cromossomas para a geração dos filhos) é o operador mais importante dos algoritmos genéticos, e normalmente respeita uma taxa de cruzamento entre 50 a 60%, determinada inicialmente [79]. Com este operador geralmente dois cromossomas, chamados de *pais*, são combinados para formarem novos cromossomas, chamados de “filhos”. Os pais são selecionados na população com preferência pelos mais adaptados, de modo a que os filhos



herdem os bons genes que fazem com que os pais sejam os mais adaptados. O operador mutação introduz mudanças aleatórias nas características dos cromossomas. Geralmente a mutação é aplicada ao nível do gene com uma probabilidade de mutação menor que 1% [79]. Assim o novo cromossoma não será muito diferente do cromossoma original. A mutação tem um papel importante no AG. Enquanto que o operador recombinação leva a uma convergência na população, a mutação reintroduz a diversidade na população ajudando a procura a sair de ótimos locais. A reprodução envolve a seleção de cromossomas para a nova geração. Na maior parte dos casos, a aptidão de um indivíduo determina a probabilidade da sua sobrevivência para a próxima geração [79] e [86].

Tendo em consideração as suas características optou-se por desenvolver um algoritmo do tipo NSGA-II (*Fast Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) para a otimização multiobjectivo [87], tendo como objetivo determinar o local, tipo e número de dispositivos de interrupção para o aumento da fiabilidade das redes de distribuição radiais. O primeiro algoritmo NSGA (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) tem sido utilizado na otimização multiobjectivo, e embora seja um algoritmo eficaz, é normalmente criticado pela sua complexidade computacional, pela falta de elitismo e pela utilização de um parâmetro de valor ótimo para o procedimento de partilha. Deste modo foi desenvolvida uma versão modificada, denominada de NSGA-II (*Fast Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*), com uma melhor metodologia de ordenação, que incorpora elitismo e sem necessidade de atribuição inicial de um parâmetro de partilha. O algoritmo evolucionário NSGA-II foi desenvolvido por Deb *et al.* em 2000 [88], [87], e para além de usar uma estratégia de preservação elitista possui também um mecanismo explícito de preservação de diversidade. Com este mecanismo de preservação de diversidade, este algoritmo garante uma boa convergência para a fronteira de Pareto sem perder a diversidade de soluções. As principais características deste algoritmo são a utilização de uma população conjunta e a rapidez do operador de ordenação por dominância. O ciclo completo do algoritmo NSGA-II é apresentado na Figura 3-4.

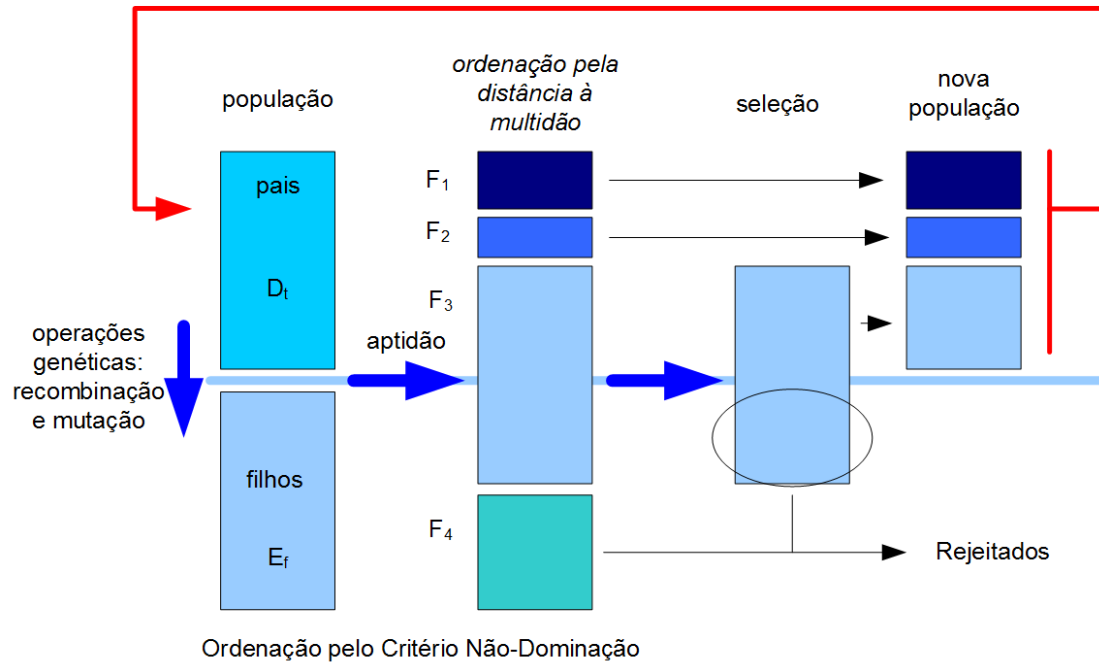


Figura 3-4: Procedimento de cálculo do algoritmo genético NSGA-II.  
(Fonte: adaptação K. Deb, [87])

Em cada geração  $t$ , a população de “filhos”  $E_f$ , é gerada a partir da população de “pais”  $D_t$ . Ambas as populações possuem o mesmo número de soluções  $N$ . A fronteira das soluções não dominadas ( $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ ) será obtida a partir da combinação de ambas as populações  $R_f$  de tamanho  $2N$ . Para manter a diversidade da fronteira de Pareto, depois de ter sido efetuada a escolha das soluções não dominadas, é atribuída a cada solução uma distância relativa à restante multidão (*crowding distance*). Deste modo, para cada solução haverá um valor de distância à multidão para estimar a densidade de soluções em torno de uma qualquer solução. Genericamente o algoritmo desenvolvido para este problema é dado por:

1. Inicializar  $t = 1$ . Aleatoriamente gerar  $N$  soluções para formar a primeira população,  $P_1$ . Avaliar a aptidão das soluções em  $P_1$ ;
2. Recombinação: gerar uma população de filhos  $Q_t$  do seguinte modo:
  - 2.1. Escolher duas soluções  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{y}$  de  $P_1$  baseado nos valores da aptidão;
  - 2.2. Utilizando um operador de recombinação, gerar uma população de filhos e adicioná-los a  $Q_t$ .
3. Mutação: mutar cada solução  $\mathbf{x} \in Q_t$  com uma probabilidade predefinida de mutação;

4. Aptidão: avaliar e assignar um valor de aptidão a cada solução  $x \in Q_t$  baseado nas funções objetivo e nas suas restrições;
5. Seleção: selecionar  $N$  soluções de  $Q_t$  baseado na sua aptidão e assigna-las para  $P_{t+1}$ ;
6. Se o critério de paragem é satisfeito, terminar a procura e devolver a população atual, senão colocar  $t = t + 1$  e passar ao passo 2.

### 3.5.1 POPULAÇÃO

A população é inicializada de modo aleatório. A dimensão da população é um parâmetro de entrada do algoritmo, sendo possível considerar quer dimensão. A população pode tomar qualquer dimensão, podendo portanto ser composta por um número qualquer de indivíduos. No entanto, a dimensão escolhida para a população, afeta a qualidade das soluções obtidas. Para populações pequenas, em geral obtêm-se uma menor diversidade, que por sua vez pode levar à convergência prematura e à fraca qualidade das soluções. Por outro lado, quanto maior for a dimensão da população, maior será o tempo necessário de processamento do algoritmo. A escolha da dimensão da população adquire uma maior importância consoante o tamanho da rede de distribuição. Se se analisar uma rede com bastantes nós, o esforço computacional também será maior. Se a isto adicionarmos uma população com uma dimensão elevada, o tempo de processamento poderá aumentar para valores incomportáveis. Nesta inicialização, depois de experimentados diversos números para a população inicial, optou-se por utilizar uma população inicial com 100 indivíduos.

### CODIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Para o problema da colocação ótima de dispositivos de interrupção na rede de distribuição radial definiu-se um indivíduo como um vetor no qual cada elemento corresponde a um nó da rede de distribuição. Dentro de cada elemento do vetor será colocado um número inteiro, “0”, “1” ou “2”, correspondendo o “0” a um nó sem dispositivo de corte, o “1” a um dispositivo de interrupção do Tipo 1 e o “2” a um dispositivo de interrupção do Tipo 2. Na Figura 3-5 apresenta-se a estrutura adotada para os indivíduos, considerando uma rede de  $N$  nós genéricos.

1	0	0	1	2			2	0
1	2	3	4	5			N-1	N

Figura 3-5: Estrutura adotada para os indivíduos, para uma rede de N nós genéricos.

Deste modo, o comprimento dos indivíduos varia consoante o tamanho da rede a ser analisada. O número de nós é um parâmetro de entrada do algoritmo, sendo possível considerar qualquer tamanho de rede.

### 3.5.2 ORDENAÇÃO E APTIDÃO

Depois de inicializada a população, esta é ordenada baseada numa abordagem de ordenação de Pareto. Este género de abordagens utilizam explicitamente o conceito de dominância de Pareto, para avaliar a aptidão e para atribuir uma probabilidade de seleção às soluções. A população é ordenada de acordo com a regra da dominância, sendo depois atribuído a cada solução um valor de aptidão baseado na sua posição dentro da população e não com o valor concreto da função objetivo. Para um problema de minimização, uma solução com uma posição menor, corresponde a uma melhor solução para o problema. O procedimento de ordenação considerado neste problema foi proposta por Goldberg [89] do seguinte modo:

1. Atribuir  $i = 1$  e  $TP = P$ ;
2. Identificar as soluções não dominadas em  $TP$  e atribui-las à fronteira  $F_1$ ;
3. Atribuir  $TP = TP/F_1$ . Se  $TP = \emptyset$  passar ao ponto 4 senão  $i = i + 1$  e passar ao ponto 2;
4. Para cada solução  $\mathbf{x} \in P$  na geração  $t$ , atribuir número de ordenação  $r(\mathbf{x}, t) = i$  se  $\mathbf{x} \in F_i$ ;

Neste procedimento  $F_1, F_2, \dots$ , são chamadas de fronteiras não dominadas, sendo  $F_1$  a fronteira de Pareto da população  $P$ . A primeira fronteira é constituída pelo conjunto de soluções não-dominadas da população  $P$ . A segunda fronteira é constituída pelo conjunto de soluções que são apenas dominadas pelas soluções da primeira fronteira e assim sucessivamente para as restantes fronteiras (Figura 3-6).

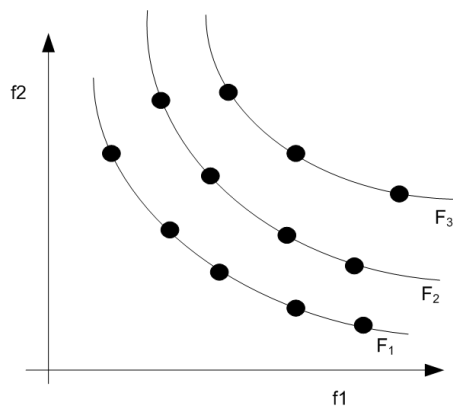


Figura 3-6: Ordenação da população baseada no critério de dominância de Pareto.

A cada indivíduo de cada fronteira é atribuído um valor de aptidão (*fitness*) baseado na fronteira a que pertence. Aos indivíduos na primeira fronteira é atribuído o valor de 1, aos da segunda fronteira o valor de 2 e assim por diante.

### 3.5.3 DISTÂNCIA À MULTIDÃO

Manter a diversidade da população é uma questão importante na otimização multiobjectivo com utilização de algoritmos genéticos, de forma a obter-se soluções uniformemente distribuídas ao longo da fronteira de Pareto. Se não forem tomadas providências, a população tende a formar poucos aglomerados na otimização multiobjectivo utilizando algoritmos genéticos [79]. Este fenómeno é conhecido como deriva genética, sendo possível aplicar algumas abordagens para prevenir este fenómeno.

Uma dessas abordagens é chamada de Partilha de Aptidão (*Fitness Sharing*) e tem como objetivo fomentar a procura de soluções em zonas não exploradas do espaço de soluções, através da redução artificial da aptidão de soluções em zonas de maior densidade populacional. Uma desvantagem desta abordagem consiste na definição de um parâmetro de *nicho* “ $\sigma$ ” de espaço de procura no espaço de soluções. Este parâmetro tem que ser definido pelo utilizador. Uma outra abordagem, chamada de Distância à Multidão (*Crowding Distance*), tem como objetivo a obtenção de soluções uniformemente distribuídas ao longo da melhor fronteira de Pareto conhecida, sem necessitar de se especificar um parâmetro de *nicho* “ $\sigma$ ”. Um método utilizando a abordagem Distância à

Multidão foi proposto por [90]. Neste trabalho adotou-se esta abordagem, tal como é descrita pelos seguintes passos:

- Para todas as soluções a distância à multidão será inicializada a zero:  $F_i(d_j) = 0$ , onde  $j$  corresponde ao  $j$ -ésimo indivíduo da fronteira  $F_i$ ;
- Para cada função objetivo  $m$ ,
  - Ordenar os indivíduos na fronteira  $i$ , baseado no valor da função objetivo  $m$ , isto é,  $S = \text{sort}(F_i, m)$ ;
  - Atribuir uma distância infinita aos indivíduos nos extremos de cada fronteira  $F_i$ , de modo a que eles sejam sempre escolhidos, isto é  $S(d_1) = \infty$  e  $S(d_n) = \infty$ ;
  - Para os outros indivíduos é atribuído uma distância tendo em conta  $S(d_j) = S(d_j) + \frac{S(j+1).m - S(j-1).m}{f_m^{\max} - f_m^{\min}}$ , onde  $S(j).m$  é o valor do indivíduo  $k^{th}$  em  $S$ ;
  - Para determinar o total da distância à multidão  $S(\mathbf{x})$  de uma solução  $\mathbf{x}$ , somar as distâncias à multidão relativamente a cada função objetivo, isto é,  $S(\mathbf{x}) = \sum_m c d_m(\mathbf{x})$ .

A ideia subjacente ao cálculo da distância à multidão está na determinação da distância euclidiana entre cada individuo pertencente à mesma fronteira, baseado nos  $m$  objetivos. Os indivíduos nos extremos são sempre selecionados, uma vez que possuem distância infinita. No cálculo da distância determina-se a distância Euclidiana entre duas soluções consecutivas do plano das soluções não-dominadas. A principal vantagem da abordagem acima descrita é que a medida de densidade da população em torno da solução é calculada sem necessidade de especificar um parâmetro definido pelo utilizador. No algoritmo NSGA-II, a distância à multidão é utilizada como medida de desempate do seguinte modo. Aleatoriamente selecionar duas soluções  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{y}$ . Se as soluções estiverem na mesma fronteira não dominada, a solução com o maior valor de distância à multidão ganha.

#### 3.5.4 SELEÇÃO

São selecionados dois indivíduos a partir da população de pais (população inicial), com a aplicação do método de Roleta. Este método seleciona um cromossoma com

probabilidade proporcional à sua aptidão. Depois um deles é selecionado para a recombinação através da aplicação do método de Torneio. Este método seleciona um cromossoma a partir de competições, entre os dois cromossomas escolhidos, utilizando um operador de multidão (*crowded*). Os indivíduos selecionados farão parte do grupo utilizado para a recombinação. O operador de multidão compara dois indivíduos e devolve o vencedor do torneio. A solução  $i$  ganha o torneio sobre a solução  $j$ , se se verificarem uma das seguintes condições baseadas na ordenação de soluções não dominadas  $R_i$  e a distância à multidão  $F_i(S_p)$ :

- Se  $R_i < R_j$  (solução que está numa melhor fronteira não-dominada);
- Se  $R_i = R_j$  e  $F_i(S_p) > F_i(S_q)$  (a solução localizada numa área com menor multidão ganha).

Os indivíduos são assim selecionados utilizando uma seleção por torneio aplicando um operador de multidão.

### 3.5.5 OPERADORES GENÉTICOS

#### RECOMBINAÇÃO (*CROSSOVER*)

A recombinação produz dois novos indivíduos – chamados de filhos e é geralmente realizada aplicando um dos seguintes métodos:

Cruzamento de 1 ponto: realiza um corte único de cada cromossoma e combina os materiais genéticos divididos de cada cromossoma;

Cruzamento de 2 pontos: realiza dois cortes e similarmente combina os materiais genéticos divididos.

Cruzamento em vários pontos: realiza vários cortes de acordo com uma função de probabilidade que gera o número de cortes a realizar.

Nesta abordagem e após diversos testes, considerou-se para a recombinação o cruzamento de um ponto (a 50%). Deste modo, um dos dois cromossomas gerados, possui a primeira metade de um cromossomas (pai) e a segunda metade de outro cromossoma (pai). O outro cromossoma gerado possui a segunda metade do primeiro cromossoma (pai) e a primeira metade do segundo cromossoma (pai).

## MUTAÇÃO

O operador de mutação pretende introduzir e manter uma diversidade na população de indivíduos, alterando aleatoriamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida. Este operador fornece meios para a introdução de novos elementos na população, assegurando que a probabilidade de se atingir qualquer ponto do espaço de procura nunca seja zero, com o intuito de tentar contornar o problema de ótimos locais. Esta operação geralmente processa-se de modo aleatório, respeitando uma taxa de mutação determinada *à priori*. De salientar que se a probabilidade for muito elevada há o risco de a procura se tornar numa procura aleatória. Alguns trabalhos recomendam a escolha da taxa de mutação com base na dimensão dos cromossomas e da população. Em [91] é sugerida uma taxa de mutação inversamente proporcional ao tamanho da população. Neste trabalho após diversos testes, foi adotado uma taxa de mutação de 1%.

### 3.5.6 SELEÇÃO DA NOVA POPULAÇÃO

A população gerada (filhos) através da recombinação é adicionada à população inicial (pais) para serem selecionados os cromossomas que farão parte da geração seguinte. Dado que os melhores indivíduos da população de “pais” e da população de “filhos” são adicionados à população atual (pais mais filhos), assegura-se o elitismo neste algoritmo. A população atual é ordenada baseado no critério de não-dominação. A próxima geração é constituída pelos elementos constantes das diversas fronteiras (começando pela de menor índice) até se preencher o número máximo  $N$  da população. Se for excedido o valor máximo da população, os indivíduos da última fronteira adicionada, serão desempatados utilizando o critério de distância à multidão. O processo recomeça até ser atingido o critério de paragem.

## 3.6 O ALGORITMO MEMÉTICO EVOLUTIVO

Para além do algoritmo de otimização descrito anteriormente, também foram desenvolvidos dois algoritmos do tipo memético. Este tipo de algoritmo é um derivado dos genéticos meta heurísticos evolutivos, onde as informações necessárias para a pesquisa não se baseiam apenas no mecanismo hereditário mas também em unidades de



informação (memes) que são compartilhados e enriquecidos por todos os indivíduos. Os algoritmos meméticos, inspirados na evolução genética e na evolução memética, foram introduzidos por Moscato em 1989 [92]. O Darwinismo Universal consiste na generalização dos genes dos sistemas biológicos para qualquer outro sistema onde unidades discretas de informação podem ser herdadas e sujeitas a forças evolucionárias de seleção e variação. O termo “meme” é utilizado para referir uma parte de informação decorrente da evolução cultural. Consiste numa unidade básica de transmissão ou imitação cultural. São um elemento de cultura que são passados às gerações seguintes por meios diferentes da herança genética. Pode-se dizer que os memes se propagam através de cérebro para cérebro por imitação, enquanto que os genes se propagam biologicamente de cromossoma para cromossoma. O objetivo da estratégia de processamento de informação está na aplicação à população de uma técnica de exploração global para localizar boas áreas no espaço de soluções, combinadas com a aplicação repetida de uma heurística de busca local a soluções individuais para localizar um ótimo local. Idealmente, os algoritmos meméticos abraçam a dualidade da evolução genética e cultural, permitindo a transmissão, seleção, herança e variação quer dos memes quer dos genes. O procedimento de cálculo genérico de um algoritmo memético é apresentado na Figura 3-7. A procura global fornece um mecanismo de exploração abrangente (*exploration*), enquanto que o melhoramento da solução individual através da busca local fornece um mecanismo de exploração local (*exploitation*).

Neste trabalho desenvolveu-se um algoritmo memético, com duas variantes, baseado no algoritmo evolutivo multiobjectivo NSGA-II com associação de um procedimento de procura local.

#### OTIMIZAÇÃO PELA PROCURA LOCAL

A procura local visa otimizar os indivíduos no que respeita às funções objetivo. Neste trabalho foram utilizadas duas variantes do algoritmo de procura local. A primeira variante do algoritmo memético, M1, é baseada na estrutura clássica enquanto que na segunda variante do algoritmo memético, M2, propõe-se uma estrutura alternativa.

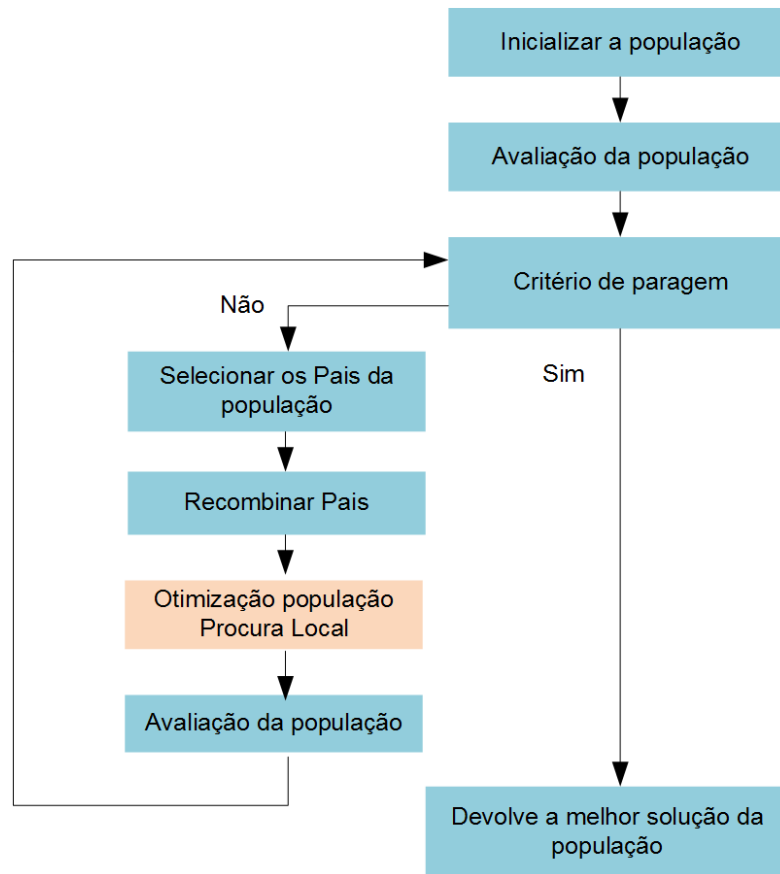


Figura 3-7: Diagrama simplificado de um procedimento de cálculo genérico do algoritmo memético.

A primeira variante do algoritmo memético possui a estrutura padronizada de um algoritmo memético, onde a busca local é efetuada depois das operações genéticas. Este procedimento é especificado mais pormenorizadamente no diagrama da Figura 3-8.

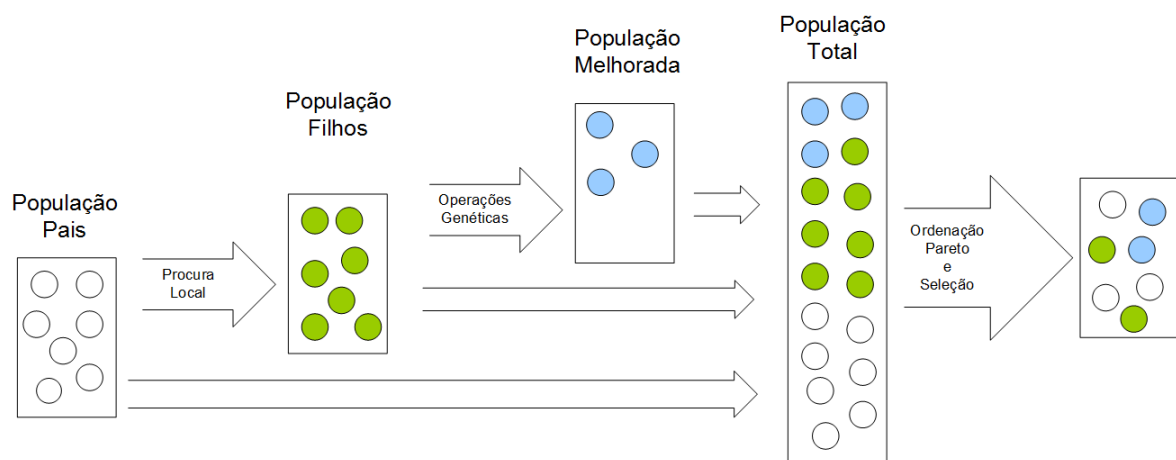


Figura 3-8: Diagrama de cálculo da primeira variante do algoritmo memético.

Nesta variação a população de filhos é gerada através da seleção, recombinação e mutação do mesmo modo que foi realizado no algoritmo NSGA-II. A procura local é aplicada às soluções na população de filhos. Se uma solução for melhorada pela procura local, ela será adicionada à população que irá ser utilizada para a geração seguinte.

O procedimento de cálculo da primeira variante do algoritmo memético (Figura 3-8) é descrito nos seguintes passos:

- Passo 1: Definição do tamanho da população  $N$ , probabilidade de mutação, índices de recombinação e mutação e número máximo de gerações;
- Passo 2: Geração aleatória da população inicial  $D_t$ . Colocar o contador de geração em  $t = 0$ .
- Passo 3: Para cada individuo da população  $D_f$  avaliar a aptidão com as funções objetivo;
- Passo 4: Geração da população de filhos  $E_f$  a partir da combinação de pais fazendo a seleção de através de torneios usando a distância à multidão e os operadores de recombinação e mutação;
- Passo 5: Aplicar uma procura local à população de filhos para obter uma nova população  $L_f$  ;
- Passo 6: Para cada individuo da população  $L_f$  avaliar a aptidão com as funções objetivo;
- Passo 7: Combinar os pais, filhos e população local ( $R_f = D_f + E_f + L_f$ );
- Passo 8: Efetuar a ordenação de  $R_f$  baseado na não-dominação, identificar as diferentes fronteiras  $F_i$  , com  $i = 1, 2, \dots$  e obter o valor da distância à multidão para cada solução;
- Passo 9: Selecionar uma nova população usando o conceito de elitismo;
- Passo 10: Se o critério de número de iterações for atingido para o processo, senão aumentar a contagem ( $t = t + 1$ ) e passar ao passo 3.

A segunda variante possui uma estrutura de um algoritmo memético não padronizada, dado que a procura local é aplicada antes das operações genéticas (Figura 3-9). A procura local será efetuada a partir da população inicial, sendo depois adicionada a esta, obtendo-se deste modo uma população melhorada. A população de filhos é gerada através da

seleção, recombinação e mutação. A população seguinte é construída a partir das populações atual, melhorada e de filhos.

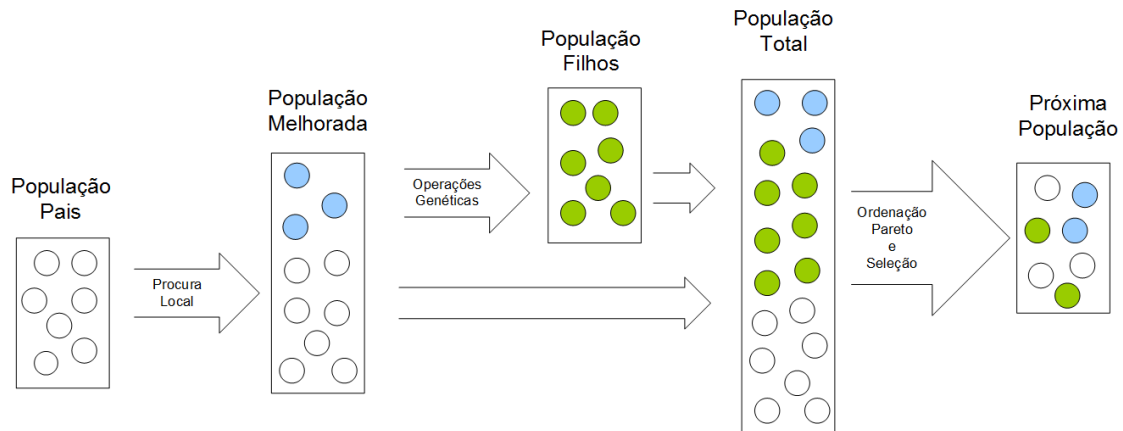


Figura 3-9: Diagrama de cálculo da segunda variante do algoritmo memético.

O procedimento de cálculo da segunda variante do algoritmo memético (Figura 3-9) é apresentada nos passos abaixo descritos:

- Passo 1: Definição do tamanho da população  $N$ , probabilidade de mutação, índice de crossover e mutação e número máximo de gerações;
- Passo 2: Geração aleatória da população inicial  $D_f$ . Colocar o contador de geração em  $t = 0$ .
- Passo 3: Para cada individuo da população  $D_f$  avaliar a aptidão com as funções objetivo;
- Passo 4: Aplicar uma procura local à população atual para obter uma nova população  $L_f$  ;
- Passo 5: Para cada individuo da população  $L_f$  avaliar a aptidão com as funções objetivo;
- Passo 6: Combinar as duas populações (  $G_f = D_f + L_f$  );
- Passo 7: Gerar a população de filhos  $E_f$  a partir de da combinação de pais em  $G_f$  fazendo a seleção de através de torneios usando a distância à multidão e dos operadores de recombinação e mutação;
- Passo 8: Combinar as populações pais e filhos (  $R_f = D_f + G_f$  );

- Passo 9: Para cada individuo da população  $R$  avaliar a aptidão com as funções objetivo;
- Passo 10: Efetuar a ordenação de  $R_f$  baseado na não-dominação, identificar as diferentes fronteiras  $F_i$ , com  $i = 1, 2, \dots$  e obter o valor da distância à multidão para cada solução;
- Passo 11: Selecionar uma nova população usando o conceito de elitismo;
- Passo 12: Se o critério de número de iterações for atingido para o processo, então aumentar a contagem ( $t = t + 1$ ) e passar ao passo 3.

### ALGORITMO DE PROCURA LOCAL

A procura local do algoritmo memético permite encontrar a localização da solução ótima de um modo mais eficiente. No entanto é importante encontrar um balanço entre a procura local e a procura global. Em cada ciclo de procura local, este operador fará dois tipos de procura na vizinhança. Numa delas será feita uma análise à vizinhança do local onde está localizado o dispositivo de interrupção. Na segunda, a procura é realizada através de uma análise aos diferentes tipos de equipamentos.

Para reduzir o esforço computacional relacionado com a procura local, pode-se utilizar uma das seguintes metodologias [93], [94]:

1. **Probabilidade da Procura Local ( $P_{PL}$ ):** Não é aplicado a procura local a todos os indivíduos. A probabilidade de aplicação da procura local a cada individuo tem em consideração uma probabilidade ( $P_{PL}$ ) definida nos parâmetros dos algoritmos.
2. **Extensão da Procura Local ( $C_{PL}$ ):** Não é realizada uma procura local a toda a vizinhança de um individuo. É definido um parâmetro  $C_{PL}$  que determina o número máximo de vizinhanças a serem investigadas pelo algoritmo de procura local, para cada individuo.
3. **Frequência da Procura Local ( $I_{PL}$ ):** A aplicação da procura local não tem que ser feita em todas as interações. A procura local pode ser realizada periodicamente. O  $I_{PL}$  especifica a frequência de aplicação da procura local, de modo a que a aplicação local seja aplicada a cada  $I_{PL}$  iterações.

Neste trabalho foi adotada a ultima metodologia, onde a aplicação do algoritmo de procura local é apenas realizada de acordo com a frequência estabelecida inicialmente.

### 3.7 CASO DE ESTUDO

Com o objetivo de analisar os resultados que se poderão obter a partir das metodologias propostas, estas foram aplicadas a uma rede radial de distribuição, Portuguesa. Na Figura 3-10 é apresentado o esquema unifilar desta rede, sendo possível verificar que é composta por 94 nós, que alimentam um conjunto de consumidores. No Anexo são apresentados os dados relativamente ao número de consumidores em cada nó, assim como o número e tempos de defeitos considerado para cada troço. As abordagens propostas para a otimização multiobjectivo da fiabilidade de redes de distribuição radiais foram avaliadas através de simulações numéricas. Os três algoritmos evolutivos descritos anteriormente, foram aplicados à rede de 94 nós através de testes de simulação.

Para efeitos de análise de resultados serão designados por: a) NSGA-II, b) Memético M1 com a variante de busca local tipo M1 e c) Memético M2 com a variante de busca local tipo M2.

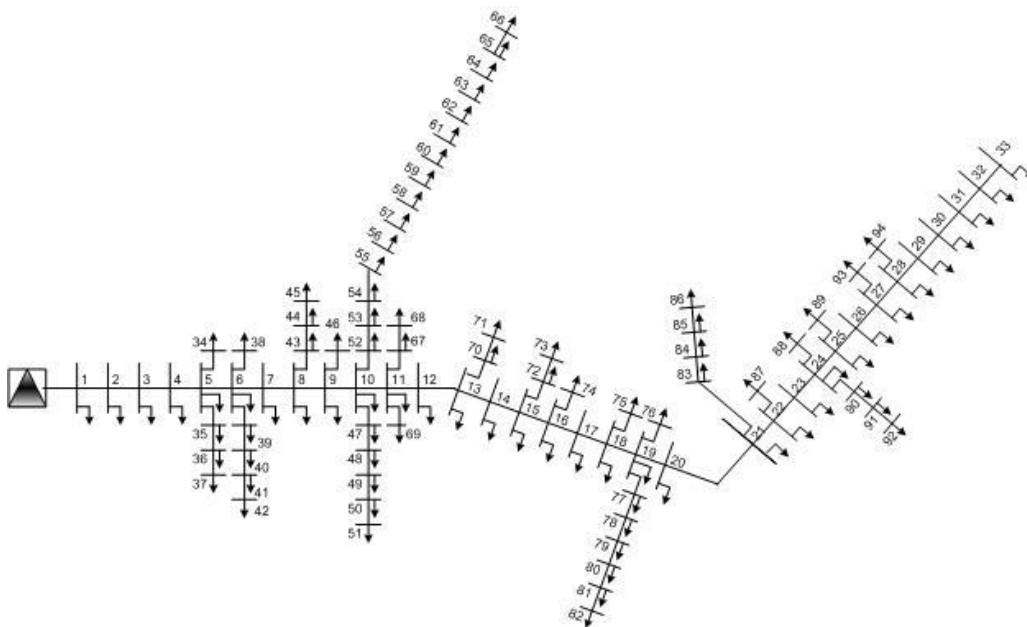


Figura 3-10: Configuração da rede de distribuição Portuguesa.

As fronteiras de Pareto obtidas com a aplicação de cada algoritmo de otimização, são apresentadas na Figura 3-11, Figura 3-12 e Figura 3-13. Estas figuras são apresentadas num espaço tridimensional, onde cada eixo representa cada uma das funções objetivo: SAIDI, SAIFI e CE. Na Figura 3-11 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do método NSGA-II. Conforme é possível verificar, os resultados desta figura estão associados à fronteira de Pareto obtida através deste método de otimização. Estes resultados da Figura 3-11 também são apresentados na Tabela 3-3.

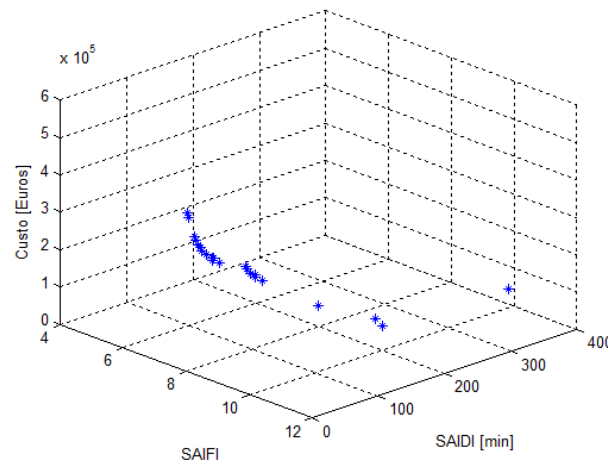


Figura 3-11: Melhor fronteira de Pareto obtida usando o algoritmo NSGA-II

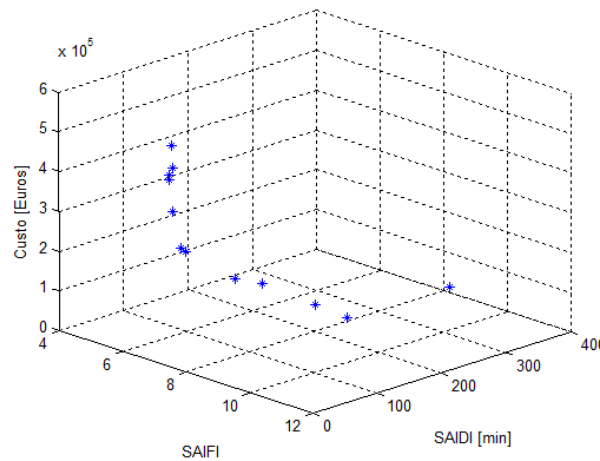


Figura 3-12: Melhor fronteira de Pareto usando o algoritmo memético M1

Na Figura 3-12 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo memético M1. Tal como no caso anterior, também aqui os resultados apresentados estão associados à fronteira de Pareto, obtida através deste ultimo método de otimização. Face ao método anterior, é possível verificar que com este método obtiveram-se menos

soluções mas uma fronteira mais extensa. Os resultados da Figura 3-12 são também apresentados na Tabela 3-4.

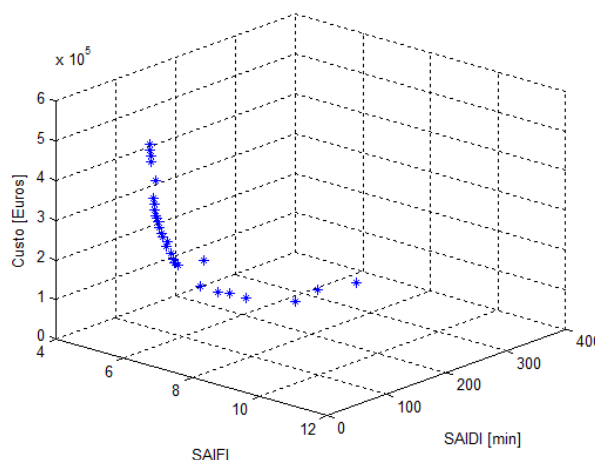


Figura 3-13: Melhor fronteira de Pareto usando o algoritmo memético M2

Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo memético M2 são apresentados na Figura 3-13. À imagem do que foi efetuado nos casos anteriores, também neste caso apresentam-se os resultados associados à fronteira de Pareto, obtida a partir deste terceiro método. Estes resultados permitem verificar que através deste método obteve-se uma maior diversidade quer relativamente ao método NSGA-II quer relativamente ao método memético M1. Os resultados da Figura 3-13 também são apresentados na Tabela 3-5

Para uma melhor comparação entre os métodos, os resultados são também apresentados num espaço bidimensional, como pode ser visto através das Figura 3-14 aFigura 3-19. As Figura 3-14 aFigura 3-16 apresentam as soluções neste espaço em que apenas se considera as funções objetivo CE vs. SAIFI para os três algoritmos. Relativamente às Figura 3-17 aFigura 3-19, estas apresentam as soluções obtidas para os três algoritmos, mas tendo apenas em consideração as funções objetivo CE vs. SAIDI. Através destas figuras, é possível verificar que existem algumas soluções dominadas. No entanto, as soluções que são dominadas tendo em consideração as funções objetivo CE vs. SAIFI, são soluções não dominadas tendo em consideração as funções objetivo CE vs. SAIDI e vice-versa. A partir destas representações, também é possível confirmar que o algoritmo memético melhora a fronteira de Pareto quanto à sua diversidade. Também é possível verificar que com este algoritmo se obtiveram melhores resultados, sobretudo tendo em consideração a função objetivo SAIDI.



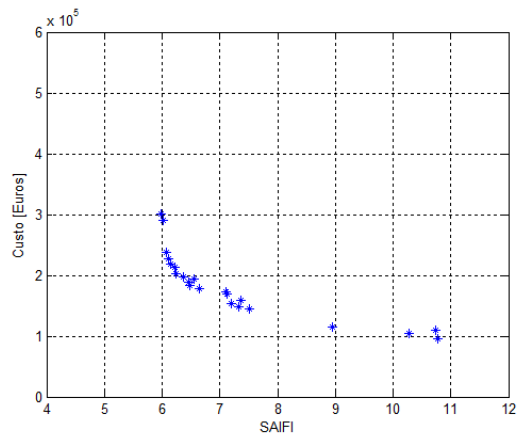


Figura 3-14: Melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo NSGA-II, para as funções objetivo CE vs. SAIFI.

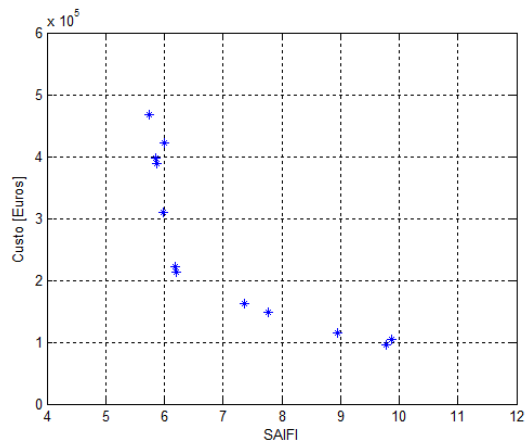


Figura 3-15: Melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo memético M1, para as funções objetivo CE vs. SAIFI.

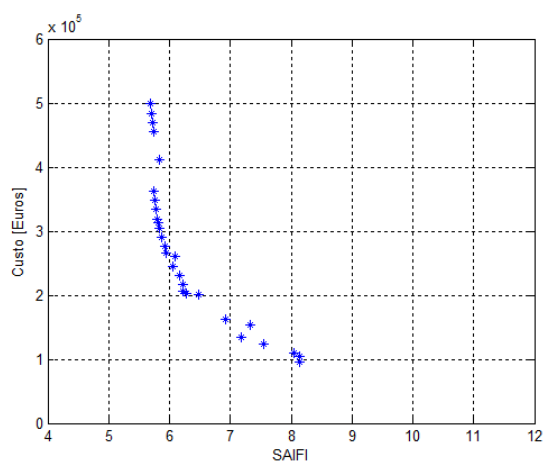


Figura 3-16: Melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIFI.

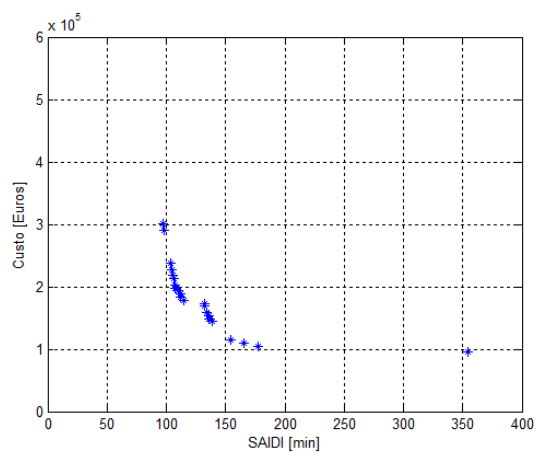


Figura 3-17: Melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo NSGA-II, para as funções objetivo CE vs. SAIDI

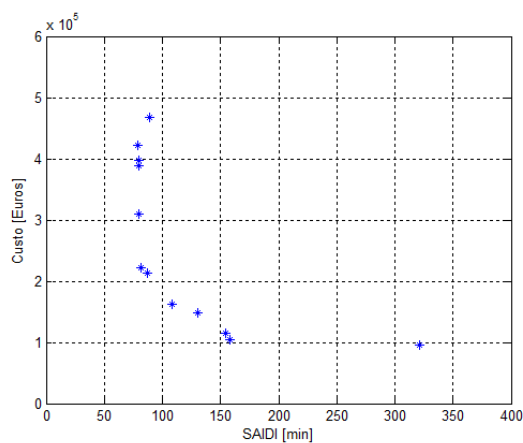


Figura 3-18: Melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo memético M1, para as funções objetivo CE vs. SAIDI

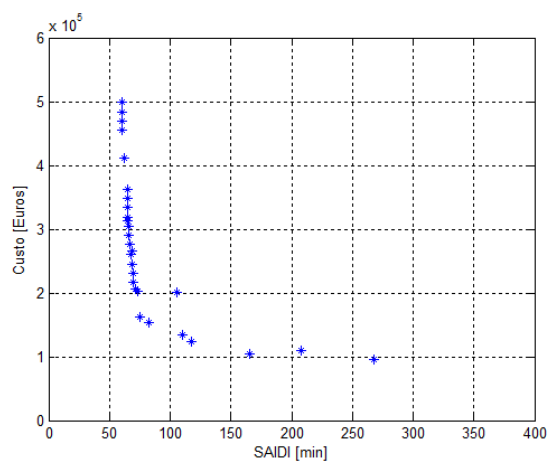


Figura 3-19: Melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIDI

Para uma análise dos resultados obtidos sob o ponto de vista das soluções extremas, são apresentadas na Tabela 3-1 as soluções mais económicas e as de maior fiabilidade para cada um dos métodos aplicados. Através desta tabela é possível verificar que com o método NSGA-II a solução que permite obter valores mínimos dos índices de fiabilidade SAIDI e SAIFI, correspondem ao custo mais elevado. Quanto à solução de custo mais reduzido, corresponde aos maiores valores dos índices de fiabilidade. Relativamente ao algoritmo memético M1 verifica-se que a solução que permite obter o menor índice de fiabilidade SAIDI é diferente da solução que permite obter o menor índice de fiabilidade SAIFI. A solução que corresponde ao menor índice de fiabilidade SAIFI, está também associada à de menor custo. O mesmo se verifica no caso das soluções que permitem obter o menor índice de fiabilidade, verificando-se ainda que à solução de menor índice de fiabilidade SAIDI, está associado um menor custo. Quanto ao algoritmo memético M2 verifica-se que existe uma solução única para a obtenção dos menores valores dos índices de fiabilidade SAIDI e SAIFI, estando também associada esta solução ao maior custo. No entanto verifica-se que existem duas soluções distintas associadas aos maiores índices de fiabilidade. A solução para o qual se obtém o maior índice de fiabilidade SAIDI é também a de menor custo. Comparando os três métodos verifica-se que através do algoritmo memético M2 obtiveram-se soluções com os menores índices de fiabilidade. Sob este ponto de vista o algoritmo NSGA-II foi o que apresentou os piores valores dos índices. Relativamente às soluções de menor custo verifica-se que são idênticas para os três métodos.

Tabela 3-1: Comparação das melhores e piores soluções obtidas com a aplicação dos três algoritmos.

	SAIDI [min]	SAIFI	Custo [Euros]
Rede Existente	361,5800	31,1100	0
	361,5800	31,1100	0
NSGA-II	<b>97,6652</b>	<b>5,9873</b>	<b>301.000</b>
	<b>354,5259</b>	<b>10,7748</b>	<b>95.000</b>
M-1	<b>69,9542</b>	6,0493	251.500
	89,1233	<b>5,7475</b>	<b>467.000</b>
	158,3632	<b>9,8726</b>	104.500
	<b>321,6351</b>	9,7752	<b>95.000</b>
M-2	<b>60,3289</b>	<b>5,6850</b>	<b>498.500</b>
	165,5189	<b>8,1426</b>	104.500
	<b>267,5375</b>	8,1310	<b>95.000</b>

**Nota:** A negrito são os valores mínimos ou máximos para cada função objetivo.

No entanto, nesta situação obtiveram-se menores valores para os índices de fiabilidade SAIDI e SAIFI através da utilização do algoritmo memético M-2. Por outro lado, é possível verificar que sem a colocação dos dispositivos de interrupção, os índices de fiabilidade para a rede de distribuição apresentam valores de 361,12 minutos para o SAIDI e de 31,33 para o SAIFI. Através desta tabela, também se verifica para a solução associada aos menores índices de fiabilidade obtêm-se reduções de 83% e 82% respetivamente para o SAIDI e SAIFI (memético M-2). Para analisar o número e a localização dos dispositivos de interrupção, é apresentada na Tabela 3-2 os resultados obtidos para a melhor e pior solução para cada um dos algoritmos. Como esperado, para as soluções com menores índices de fiabilidade, são necessários mais dispositivos de interrupção. Através desta tabela também se verifica, que nas soluções de menor custo apenas são utilizados dispositivos do tipo 1, o que de certa forma seria de esperar dado que estes equipamentos apresentam um custo inferior quando comparados com os do tipo 2.

Tabela 3-2: Número e localização dos dispositivos de interrupção para as melhores e piores soluções obtidas com a aplicação dos três algoritmos.

Algoritmo	Custo (€)	Número de dispositivos de interrupção	Localização dos Dispositivos de Interrupção
NSGA-II	301.000	44	2,4,5,6,7, <b>10</b> ,12,16, <b>18</b> ,20, <b>24</b> ,29,30,31,36,38,40,41,43,47,50, <b>51</b> ,53,56, <b>57</b> ,61,63,64,68,69,72,73,74, <b>75</b> ,76, <b>78</b> ,79,80,83, <b>84</b> ,86,87,89,92
	95.000	18	7,11,13,22,31,35,38,42,51,54,60,64,65,68,69,71,81,83
Memético M1	467.000	62	3,4, <b>5</b> ,6,7,10, <b>11</b> ,12,13, <b>15</b> ,16, <b>18</b> ,20,24,25,28,29,30, <b>31</b> ,33,34,36,37,38,39, <b>41</b> ,42,45,47,48, <b>49</b> , <b>51</b> ,52,55, <b>58</b> , <b>60</b> ,62,63,64,65,66, <b>67</b> ,69,70,71,73,74,76,77, <b>78</b> ,79,80,81, <b>82</b> ,84,86, <b>87</b> ,88,89, <b>90</b> ,91,94
	95.000	18	7,10,13,22,31,33,36,40,48,52,58,62,63,65,66,68,78,80
Memético M2	498.500	55	<b>2</b> ,4,6,7, <b>9</b> , <b>10</b> ,12, <b>15</b> , <b>18</b> ,20, <b>23</b> , <b>24</b> , <b>27</b> ,29, <b>30</b> ,31,35,37, <b>40</b> ,41, <b>44</b> , <b>47</b> , <b>50</b> ,51,54, <b>57</b> ,58, <b>60</b> ,62,63,64,65,66, <b>67</b> , <b>68</b> ,69,70,71,73,74,76,77, <b>78</b> ,79,80,81, <b>82</b> ,84,86, <b>87</b> ,88,89, <b>90</b> ,91,93
	95.000	18	7, 10,12,18,30,35,37,42,50,54,60,62,65,68,69,71,77,82

**Nota:** O negrito representa um nó com um dispositivo de corte de tipo 2.

Com o expectável, as soluções de maior custo requerem um maior número de dispositivos de corte, no entanto, apesar do algoritmo memético M2 apresentar a solução associada ao maior custo, esta requer um menor número de dispositivos de corte quando

comparado com a solução obtida pelo algoritmo memético M1. Isto deve-se ao facto da solução obtida pelo algoritmo memético M2 necessitar de um maior número de dispositivos do tipo 2 (22 em vez de 15). Por outro lado, soluções com menor custo apresentam um menor número de dispositivos de interrupção (18 equipamentos do tipo 1) mas de fiabilidade mais elevada, tal como esperado.

### 3.8 ESCOLHA DE UMA SOLUÇÃO

A partir das soluções da fronteira de Pareto (Figura 3-11, Figura 3-12, Figura 3-13), o decisor pode escolher uma das soluções, baseado na sua experiência profissional e nos objetivos ou limitações da empresa (por exemplo, limitação no investimento em equipamentos). No entanto, no sentido de fornecer mais informação ao decisor, as várias soluções também poderão ser apresentadas sob a forma de ganhos e reduções percentuais face às soluções vizinhas. Na Figura 3-20 são apresentados os resultados sob esta forma, para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo NSGA-II. De referir, que as soluções foram numeradas por ordem crescente do valor de custo. Da análise da Figura 3-20, será por exemplo possível verificar, se os ganhos obtidos para um determinado índice de fiabilidade se apresentam como uma mais-valia face à solução anterior tendo em consideração as outras duas funções objetivo (aumento de custos e diminuição/aumento do outro índice de fiabilidade). De facto para este caso, é possível verificar que com as soluções 2 e 11 obtêm-se reduções do índice de fiabilidade SAIDI muito acentuadas (49,8% e 13,1%) face às soluções anteriores (1 e 10). Embora se verifique que para estas soluções também existe uma redução no índice de fiabilidade SAIFI (4,6% e 6,5%), relativamente ao custo existe um incremento (10,1% e 2,6%) face às soluções anteriores. Deste modo, tendo em consideração os elevados ganhos percentuais do índice de fiabilidade SAIDI, e face aos custos conclui-se que estas soluções poderão ser uma opção de grande interesse face às soluções anteriores (4 e 11). Por outro lado, as soluções 5 e 21 apresentam um elevado acréscimo de custo face às soluções anteriores (25,7% e 22,3%), enquanto que os ganhos obtidos para o índice de fiabilidade SAIDI é de apenas 9,9% e 6,1% e para o índice SAIFI de 16,1% e 1,1% respetivamente para cada solução. Assim, pode-se considerar que estas soluções são pouco interessantes face às anteriores (4 e 20).

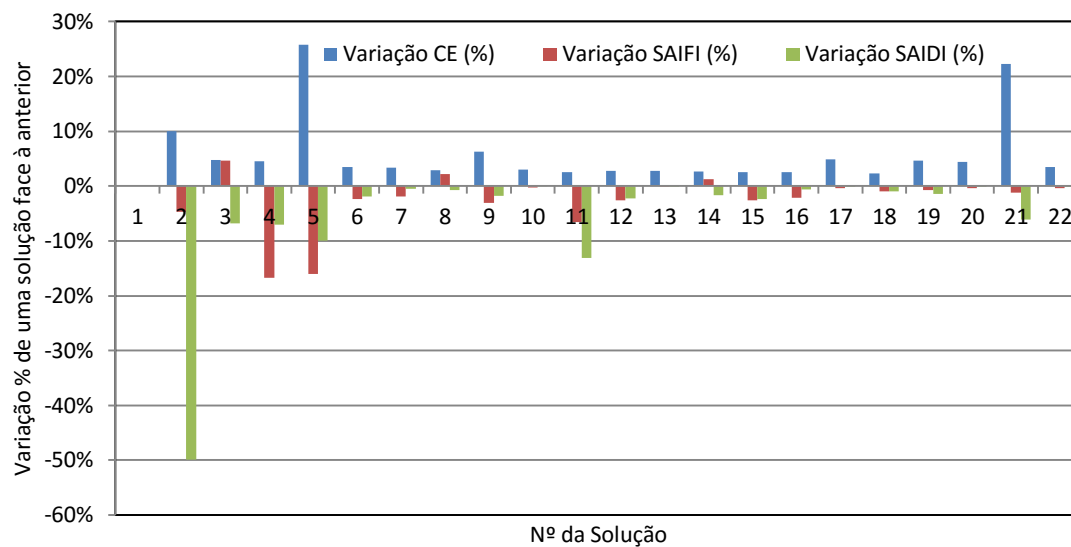


Figura 3-20: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIFI e SAIDI, para os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo NSGA-II.

Na Figura 3-21 são apresentados novamente os resultados sob a referida forma de ganhos e reduções percentuais face às soluções anteriores, mas para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M1. Através desta figura, é possível verificar que a solução mais interessante sob o ponto de vista da redução do índice SAIDI é a número 2, dado que para um aumento de custos 10% obtêm-se uma redução deste índice de 50,7%.

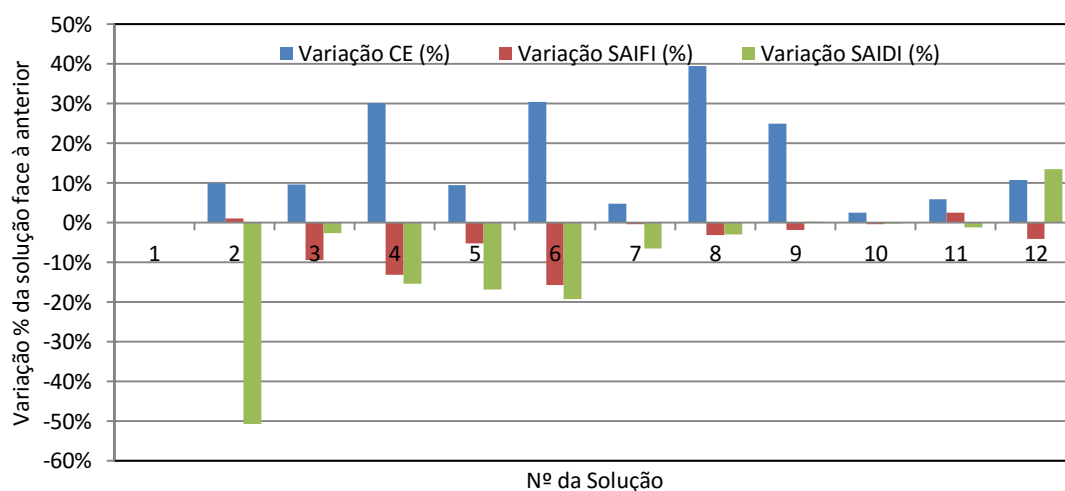


Figura 3-21: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIFI e SAIDI, para os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo Memético M1.

Por outro lado, as soluções 4, 6, 8 e 9 apresentam-se como pouco interessantes face às soluções anteriores, tendo em consideração os elevados aumentos de custo (30,1%, 30,3%, 39,5% e 24,9%) face aos ganhos que se poderão obter para os índices de fiabilidade (com uma redução para o índice SAIFI de 13,1%, 15,6%, 3,1% e 1,9% e para o índice SAIDI uma redução de 15,4%, 19,2% e 3,0% e um aumento de 0,3%).

Os resultados sob a forma de ganhos e reduções percentuais face às soluções anteriores, para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2, são apresentados na Figura 3-22. Analisando esta figura, é possível verificar que sob o ponto de vista da redução do índice SAIDI, as soluções 2, 4, 6 e 9, apresentam-se como vantajosas face às anteriores, dado que para um aumento de custos respetivamente de 10,0%, 13,2%, 14,9% e 0,3% obtêm-se uma redução deste índice de 38,1%, 43,7%, 25,1% e 30,3%. Por outro lado, as soluções 3 e 8 apresentam-se como pouco interessantes face às anteriores, dado que para além do incremento nos custos de 4,9% e 23,6%, o índice de fiabilidade SAIDI é muito penalizado (com aumento de 25,8% 39,9% respetivamente) para apenas uma ligeira redução do índice SAIFI (1,1% e 6,3%).

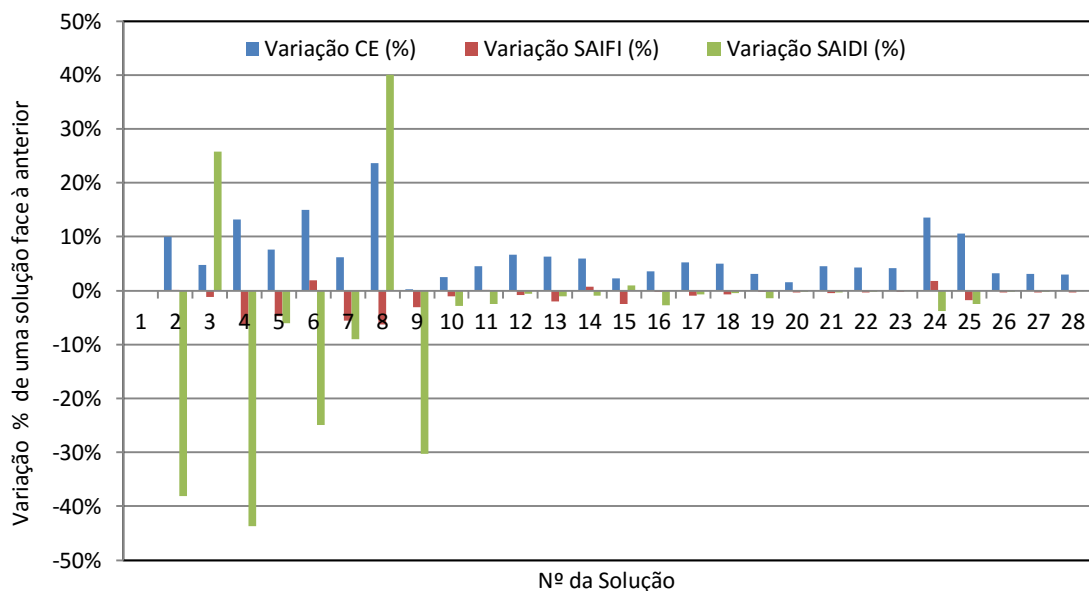


Figura 3-22: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIFI e SAIDI, para os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo Memético M2.

Também é possível verificar, que para as soluções 24 e 25, existe um aumento acentuado do custo (13,5% e 10,5%) tendo em consideração os ganhos nos índices (com uma redução para o índice SAIFI de 6,3% e 1,8% e aumento de 1,8% e para o índice SAIDI um aumento de 39,9% e uma redução de 3,7% e 2,5%).

Contudo, a escolha de soluções também poderá ser obtida através de Métodos de Decisão. Neste sentido, foram desenvolvidos alguns métodos, e destes, um dos mais adotados em problemas multiobjectivo de fiabilidade de redes de distribuição através da colocação de dispositivos de interrupção foi o método “Min-Max” [27], [95]. Com o método Min Max pretende-se maximizar a escolha de uma solução de um conjunto de soluções (fronteira de Pareto) obtidas minimizando as funções objetivo de um problema multiobjectivo. Este método considera a aplicação da equação (3-8) às soluções não dominadas da fronteira de Pareto.

$$\left( \frac{EC_{max} - EC_i}{EC_{max} - EC_{min}}, \frac{SAIDI_{max} - SAIDI_i}{SAIDI_{max} - SAIDI_{min}}, \frac{SAIFI_{max} - SAIFI_i}{SAIFI_{max} - SAIFI_{min}} \right) = (EC_i, SAIDI_i, SAIFI_i) \quad (3-8)$$

O método acima descrito foi aplicado às soluções obtidas através da aplicação do algoritmo NSGA-II. Os resultados que se obtiveram são apresentados na Tabela 3-3. De referir que a coluna Min é obtida determinando o mínimo das colunas SAIFI (i), SAIDI (i) e CE (i), enquanto que a coluna Max é obtida a partir do máximo da coluna Min.

De acordo com este método, a melhor solução a adotar deverá ser a número 6. Através da Figura 3-23 é possível verificar o lugar da solução escolhida pela aplicação do método “Min Max” no conjunto de soluções obtidas com a aplicação do método NSGA-II. Pela localização da solução adotada nos gráficos, verifica-se de um modo geral que elas se localizam próximas do vértice da fronteira de Pareto, que corresponde mais ou menos ao ponto central dessa fronteira. A solução adotada a partir deste método, otimiza a minimização das três funções objetivo de igual modo, isto é, não privilegia a minimização de uma função objetivo em detrimento das outras. Por outro lado, através da análise desta solução face aos resultados apresentados sob o ponto de vista da variação do investimento em equipamentos vs variação no SAIDI e SAIFI (Figura 3-20), verifica-se que este método não entra em consideração com esse fator.



Tabela 3-3: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo NSGA-II.

Nº Solução [i]	SAIFI	SAIDI [min]	CE [Euros]	SAIFI (i)	SAIDI (i)	CE (i)	Min	Max
1	10,7748	354,5259	95.000	0,00	0,00	1,00	0,00	0,72
2	10,2720	177,7848	104.500	0,11	0,69	0,95	0,11	
3	10,7445	165,6917	109.500	0,01	0,74	0,93	0,01	
4	8,9412	154,1024	114.500	0,38	0,78	0,91	0,38	
5	7,5078	138,8473	144.000	0,68	0,84	0,76	0,68	
6	7,3342	136,2324	149.000	0,72	0,85	0,74	0,72	
7	7,1986	135,5413	154.000	0,75	0,85	0,71	0,71	
8	7,3564	134,5247	158.500	0,71	0,86	0,69	0,69	
9	7,1325	132,1003	168.500	0,76	0,87	0,64	0,64	
10	7,1118	132,1354	173.500	0,77	0,87	0,62	0,62	
11	6,6473	114,8335	178.000	0,86	0,93	0,60	0,60	
12	6,4737	112,2186	183.000	0,90	0,94	0,57	0,57	
13	6,4698	112,0924	188.000	0,90	0,94	0,55	0,55	
14	6,5481	110,2311	193.000	0,88	0,95	0,52	0,52	
15	6,3745	107,6162	198.000	0,92	0,96	0,50	0,50	
16	6,2389	106,9251	203.000	0,95	0,96	0,48	0,48	
17	6,2144	106,8340	213.000	0,95	0,96	0,43	0,43	
18	6,1535	105,7477	218.000	0,97	0,97	0,40	0,40	
19	6,1067	104,2081	228.000	0,98	0,97	0,35	0,35	
20	6,0822	104,1170	238.000	0,98	0,97	0,31	0,31	
21	6,0118	97,7563	291.000	0,99	1,00	0,05	0,05	
22	5,9873	97,6652	301.000	1,00	1,00	0,00	0,00	

Com a solução seleccionada pelo método “Min-Max” tendo em consideração a primeira abordagem de selecção, verifica-se que existe um aumento nos custos de 3,5% face à solução anterior, para apenas uma redução dos índices SAIDI e SAIFI de 1,9% e 2,3% respetivamente. No entanto, poderá ser interessante a utilização de ambos os métodos, uma vez que o decisor poderá eventualmente escolher uma solução vizinha utilizando a informação disponibilizada pela primeira opção apresentada para a escolha de uma solução.

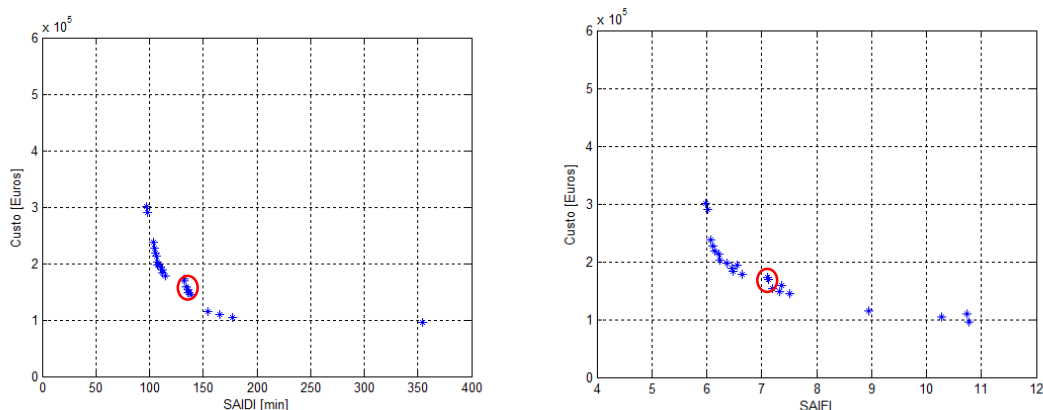


Figura 3-23: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo NSGA-II, para as funções objetivo CE vs. SAIDI e CE vs. SAIFI.

Para a primeira variante do algoritmo memético M1, a solução obtida é apresentada na Tabela 3-4. Neste caso, a solução a adotar de acordo com o método “Min-Max” deverá ser a número 6.

Tabela 3-4: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M1.

Nº Solução [i]	SAIFI	SAIDI [min]	CE [Euros]	SAIFI (i)	SAIDI (i)	CE (i)	Min	Max
1	9,7752	321,6351	95000	0,02	0,00	1,00	0,00	0,68
2	9,8726	158,3632	104500	0,00	0,65	0,97	0,00	
3	8,9412	154,1024	114500	0,23	0,67	0,95	0,23	
4	7,7651	130,3101	149000	0,51	0,76	0,85	0,51	
5	7,3602	108,3792	163000	0,61	0,85	0,82	0,61	
6	6,2069	87,4699	212500	0,89	0,93	0,68	0,68	
7	6,1811	81,7241	222500	0,89	0,95	0,66	0,66	
8	5,9873	79,2642	310500	0,94	0,96	0,42	0,42	
9	5,8737	79,4658	388000	0,97	0,96	0,21	0,21	
10	5,8492	79,3747	398000	0,98	0,96	0,19	0,19	
11	5,9927	78,4950	421500	0,94	0,97	0,12	0,12	
12	5,7475	89,1233	467000	1,00	0,92	0,00	0,00	

Na Figura 3-24 pode-se verificar o lugar da solução escolhida pela aplicação do método “Min Max” no conjunto de soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M1. Também neste caso, verifica-se que a solução adotada encontra-se mais ou menos no vértice da fronteira de Pareto.

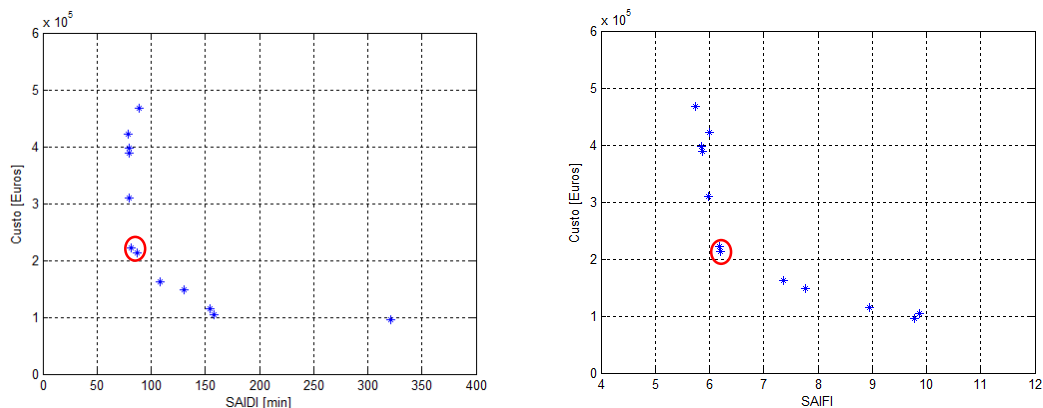


Figura 3-24: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M1, para as funções objetivo CE vs. SAIDI e CE vs. SAIFI

Comparando este resultado com os da Figura 3-21 é possível verificar que esta solução não é muito interessante face à anterior uma vez que apresenta um elevado aumento de custo (30,4%) face aos ganhos que se obtêm para os índices de fiabilidade SAIFI e SAIDI (15,7% e 16,8%). Assim tal como referido é de todo o interesse o decisor também utilizar a informação que se obtêm a partir do primeiro método de seleção.

Para a segunda variante do algoritmo memético M2, os resultados obtidos de acordo com o método “Min-Max” são apresentados na Tabela 3-5. Neste caso, a solução a adotar deverá ser a solução número 9. De referir, que face à solução anterior (ver Figura 3-22) esta é uma boa solução uma vez que para a penas um aumento de investimento de 0,3% obtêm-se ganhos nos índices de fiabilidade SAIDI e SAIFI de 3,0% e 30,3% respetivamente. Quanto à solução 8 (anterior à escolhida) não apresenta interesse, uma vez que face à solução anterior exige um custo de investimento muito elevado (23,6%) para um pequeno ganho no índice SAIFI (6,3%). Para além disso, existe uma forte penalização do índice SAIDI (40,0%).

Tabela 3-5: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2.

Nº Solução [i]	SAIFI	SAIDI [min]	CE [Euros]	SAIFI (i)	SAIDI (i)	CE (i)	Min	Max
1	8,1310	267,5375	95.000	0,00	0,00	1,00	0,00	0,73
2	8,1426	165,5189	104.500	0,00	0,49	0,98	0,00	
3	8,0497	208,2362	109.500	0,04	0,29	0,96	0,04	
4	7,5401	117,2728	124.000	0,25	0,73	0,93	0,25	
5	7,1876	110,1228	133.500	0,39	0,76	0,90	0,39	
6	7,3264	82,6775	153.500	0,33	0,89	0,86	0,33	
7	6,9161	75,2610	163.000	0,50	0,93	0,83	0,50	
8	6,4812	105,3984	201.500	0,68	0,78	0,74	0,68	
9	6,2843	73,4416	202.000	0,76	0,94	0,73	0,73	
10	6,2211	71,3629	207.000	0,78	0,95	0,72	0,72	
11	6,2240	69,6109	216.500	0,78	0,96	0,70	0,70	
12	6,1706	69,2495	231.000	0,80	0,96	0,66	0,66	
13	6,0474	68,4968	245.500	0,85	0,96	0,63	0,63	
14	6,0904	67,8576	260.000	0,84	0,96	0,59	0,59	
15	5,9427	68,5310	266.000	0,90	0,96	0,58	0,58	
16	5,9276	66,6835	275.500	0,90	0,97	0,55	0,55	
17	5,8718	66,2413	290.000	0,92	0,97	0,52	0,52	
18	5,8313	65,9666	304.500	0,94	0,97	0,48	0,48	
19	5,8196	65,0462	314.000	0,95	0,98	0,46	0,46	
20	5,8005	64,9097	319.000	0,95	0,98	0,44	0,44	
21	5,7708	64,7089	333.500	0,97	0,98	0,41	0,41	
22	5,7514	64,5772	348.000	0,97	0,98	0,37	0,37	
23	5,7367	64,5416	362.500	0,98	0,98	0,34	0,34	
24	5,8389	62,1125	411.500	0,94	0,99	0,22	0,22	
25	5,7379	60,5801	455.000	0,98	1,00	0,11	0,11	
26	5,7185	60,4484	469.500	0,99	1,00	0,07	0,07	
27	5,7013	60,3320	484.000	0,99	1,00	0,04	0,04	
28	5,6850	60,3289	498.500	1,00	1,00	0,00	0,00	

A Figura 3-25 apresenta sobre a fronteira de Pareto a solução a adotar de acordo com o método “Min-Max”. Novamente se confirma que a solução adotada encontra-se aproximadamente no vértice da fronteira de Pareto.

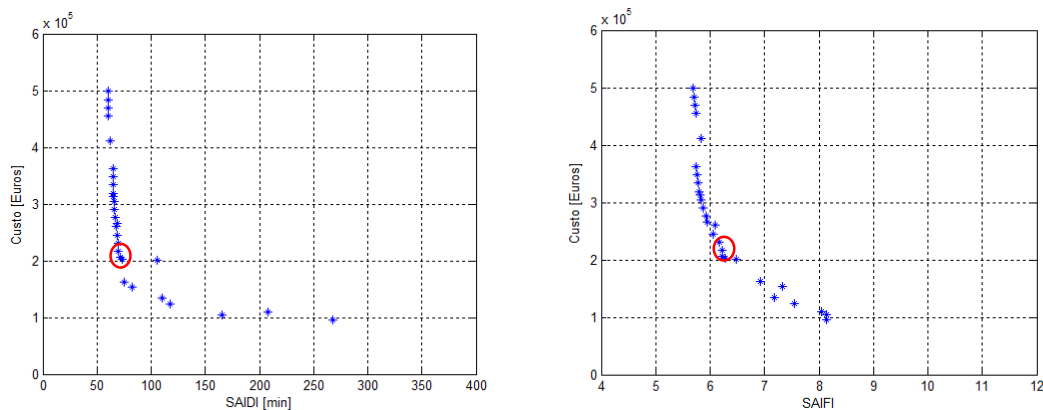


Figura 3-25: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIDI e CE vs. SAIFI.

Tal como referido anteriormente, com aplicação do método “Min-Max” pretendeu-se maximizar a escolha de uma solução, a partir de um conjunto de soluções (fronteira de Pareto) obtidas através da minimização simultânea das várias funções objetivo. Pela localização das soluções adotadas nos gráficos, verificou-se que todas elas se localizam aproximadamente no vértice da fronteira de Pareto, que corresponde mais ou menos ao ponto central dessa fronteira. Comparando as três soluções adotadas pela aplicação do método “Min-Max”, a partir da aplicação dos três algoritmos, é possível verificar que nenhum algoritmo obteve uma solução para a qual associada a esta esteja o menor valor das três funções objetivo. Assim, do ponto de vista do índice de fiabilidade SAIDI a melhor solução foi obtida a partir do algoritmo memético M1 (com ganhos de 15% e 1% face aos algoritmos NSGA-II e memético M2, respetivamente). Relativamente ao índice de fiabilidade SAIFI, foi através do algoritmo memético M2 que se obteve a melhor solução (com ganhos de 46,2% e 16,3% face aos algoritmos NSGA-II e memético M1, respetivamente). Finalmente, para a terceira função objetivo, a melhor solução foi obtida a partir do algoritmo NSGA-II (com ganhos de 30,6% e 26,2% face aos algoritmos memético M1 e memético M2, respetivamente). Contudo analisando sob o ponto de vista das três funções objetivo, pode-se considerar que a melhor solução está associada ao algoritmo memético M2.

### 3.9 CONCLUSÕES

Neste capítulo, foi abordado o problema do planeamento de redes de distribuição radiais, tendo em consideração a colocação de dispositivos de interrupção para a otimização dos principais índices de fiabilidade. Este problema, tratado como um problema multiobjectivo, consiste na otimização da fiabilidade da rede de distribuição realizado através da minimização de três funções objetivo. De forma a otimizar estes índices, devem ser determinados os índices de fiabilidade SAIDI e SAIFI assim como o custo dos equipamentos.

Neste contexto, foram propostos modelos tendo em consideração, o número, a localização e o tipo de dispositivo de interrupção. Na abordagem multiobjectivo foram propostos algoritmos de otimização do tipo evolutivo. Assim, propôs-se utilizar um algoritmo do tipo NSGA-II e um algoritmo memético. Este último é baseado no algoritmo genético NSGA-II, com incorporação de uma procura local, para melhorar a eficiência de procura das soluções ótimas.

Relativamente a este algoritmo memético, foram propostas duas variantes. Na primeira variante a procura local é aplicada depois das operações genéticas. Na segunda variante, a procura local é aplicada à população corrente. Para testar o desempenho dos algoritmos propostos, estes foram aplicados a uma rede de distribuição radial Portuguesa. Através dos resultados obtidos foi possível verificar que a abordagem proposta pode ser utilizada como uma válida ferramenta de planeamento, permitindo ao decisor a escolha de uma solução com base nos parâmetros escolhidos para a fiabilidade da rede (SAIDI e SAIFI) e para o investimento pretendido em equipamentos. Também foram apresentadas metodologias para a possível escolha de uma solução final.

## **Planeamento Multiobjectivo em Redes Distribuição Radiais integrando Geração Distribuída**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Como já foi referido, as mudanças climáticas elevaram a consciência internacional sobre os impactos que a geração de eletricidade e o uso que a energia têm sobre o meio ambiente. Neste contexto, a produção local de cogeração assim como o uso local de fontes de energia renováveis são consideradas como algumas das opções mais promissoras para fornecimento de energia mais segura, limpa e eficiente. A Geração Distribuída (GD) é definida como "uma fonte de energia elétrica ligada diretamente à rede de distribuição ou no lado da contagem do cliente". As tecnologias mais comuns de GD incluem a geração de energia elétrica a partir de produção fotovoltaica, geradores eólicos e sistemas hídricos de micro geração. No momento, a GD é considerada dentro do conceito mais amplo de Recursos Energéticos Distribuídos (RED) que também inclui o armazenamento de energia. Num futuro próximo é expectável que se assista à utilização maciça de sistemas de energias renováveis na forma de GD. Neste contexto, de modo a maximizar o benefício de tal utilização, são imperativas novas filosofias de desenho de topologias de redes e de restauração rápida após perturbações no sistema. À medida que as fontes de geração distribuída de energias renováveis aumentam no sistema, são também esperados aumentos de rentabilidade a partir do redesenho das topologias das redes de energia elétrica.

Ao nível das redes rurais de pequena potência, onde é esperada a ligação de grandes quantidades de recursos renováveis, os impactos no aumento de tensão e na capacidade térmica das linhas poderão limitar a integração destes recursos. Em redes urbanas malhadas, onde um grande número de micro unidades de geração de energia poderiam potencialmente ser instaladas, os limites térmicos e a coordenação de proteções, serão os fatores limitativos mais comuns a restringir estas ligações. No entanto em alguns países a reconfiguração de redes radiais tem algumas limitações como a impossibilidade de operação em ilha. Também em muitos deles, existem contratos com os operadores de geração distribuída (GD) que obriga a comprar toda a sua geração de energia. Contudo, depois de um defeito, aumenta a indisponibilidade da ligação das GD, resultando num desperdício de recursos na forma de pagamentos aos operadores de GD. Assim, a colocação ótima de dispositivos de interrupção contribui para a redução da indisponibilidade da GD. Ao escolher a localização, o número e o tipo de dispositivos de interrupção na rede de distribuição, após um defeito é possível retirar da rede as partes sob defeito, mantendo a ligação da GD à rede. Nesta situação, a disponibilidade da ligação da GD é aumentada. No âmbito da fiabilidade das redes de distribuição radiais com integração de GD, neste capítulo serão propostos modelos de otimização multiobjectivo para a localização de dispositivos de interrupção. Também serão propostos modelos que permitam abordar esta otimização sob o ponto de vista da melhoria da redução dos gases de efeito de estufa e para a melhoria da energia não distribuída em redes de distribuição radiais com geração distribuída incorporada. Para a resolução destes problemas será proposto um algoritmo multiobjectivo do tipo evolutivo. Por fim serão apresentados diversos resultados desta otimização no âmbito de um caso de estudo.

## 4.2 REDES DE DISTRIBUIÇÃO INTEGRANDO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Podem ser obtidos diversos benefícios com a correta integração da GD. Por exemplo, se a GD estiver colocada próximo dos centros de consumo e com uma produção coincidente com a procura, reduz o trânsito de potência nas linhas. Esta redução no trânsito de potência resulta num perfil de tensão melhor e numa redução das perdas na linha. Para além disso se a GD gerar energia em horas de ponta, podem ser diferidos no tempo os investimentos na rede. Similarmente a fiabilidade das redes pode ser aumentada com GD de produção



constante e ligada a redes malhadas, ou pela possibilidade de operação da GD em modo de ilha quando ligadas a redes radiais [41], [46], [42], [52], [96], [97]. Muitos destes efeitos técnicos traduzem-se em benefícios para o Operador de Sistemas de Distribuição (OSD) (ex. redução de perdas, deferimento dos investimentos, aumento da fiabilidade), ou para os clientes (ex. aumento da fiabilidade). Os benefícios económicos para os donos dos RED resultam do aumento das vendas. Para a sociedade, a utilização de Recursos de Energia Renováveis (RER) reduz as emissões de gases de efeito de estufa. As redes de distribuição foram desenhadas na sua grande maioria para um trânsito de potência unidirecional, de tensões mais elevadas para tensões mais baixas e não para acomodar uma grande penetração de RED. Em resultado, GD mal colocadas, com produção não coincidente com a procura ou com capacidade que largamente excede a capacidade das linhas introduz efeitos negativos tais como trânsito de potência inverso, aumento das perdas nas linhas e aumento do nível de tensão. Outros impactos da utilização de RED incluem a degradação da qualidade da tensão, ao injetarem harmónicas devido á utilização de dispositivos eletrónicos de potência, assim como um aumento da instabilidade da rede devido á sua baixa inercia [75], [42]. A operação das redes de distribuição tem que ser mantida em todo o momento dentro dos limites de projeto e operação das linhas, para fornecer uma boa qualidade de energia e evitar danos nos equipamentos. Deste modo o impacto técnico dos RED pode limitar a sua instalação e restringir os seus benefícios económicos e ambientais. Nas redes rurais de fraca potência, onde se espera a localização de grandes quantidades de RED, os impactos no nível de tensão e nos limites térmicos deverão limitar a integração dos RED. Nas redes urbanas malhadas, onde grandes quantidades de micro produções poderiam ser instaladas, os limites térmicos e de defeito são os fatores mais comuns de constrangimento. Deste modo a integração dos RED é um problema multiobjectivo, em que muitos interesses muitas vezes em conflito necessitam de ser otimizados simultaneamente e onde um compromisso entre diversas perspetivas (produtores, operadores, reguladores) tem que ser encontrado. Métodos de otimização multiobjectivo apropriados que considerem impactos técnicos, ambientais e económicos, podem fornecer um melhor balanceamento entre as vantagens e desvantagens da integração dos RED.

### 4.3 FIABILIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO INTEGRANDO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A utilização de dispositivos de interrupção na rede de distribuição aumenta a fiabilidade da rede e reduz a indisponibilidade da GD, através da separação das partes sob defeito da restante rede. Ao serem retirados os troços sob defeito, poderá ser possível manter a GD ligada à rede, o que reduz a sua indisponibilidade. Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos neste contexto. Contudo nestas abordagens a utilização de equipamentos de interrupção é utilizada de modo a colocar a GD a funcionar em ilha, em caso de existência de um defeito. No entanto, em diversos países existe legislação que não permite este tipo de funcionamento. Por outro lado, o funcionamento em ilha poderá não ser possível por motivos técnicos, tais como, potência insuficiente por parte da GD para satisfazer a carga ou incapacidade de regular essa GD. Deste modo, neste capítulo será considerado a colocação ótima de dispositivos de interrupção considerando a indisponibilidade dos geradores, a fiabilidade da rede e os custos dos equipamentos, sem possibilidade de operação da rede em ilha. Neste contexto, são propostas duas abordagens para determinar o número, o tipo e a localização ótima destes equipamentos. Uma das abordagens minimiza diretamente a indisponibilidade da GD enquanto que a outra considera a indisponibilidade da GD integrada em índices de fiabilidade compostos. Os índices de fiabilidade da rede assim como o custo dos equipamentos já foram abordados no capítulo anterior. Como exemplo para a análise do cálculo da indisponibilidade dos geradores, será utilizada a rede apresentada na Figura 4-1.

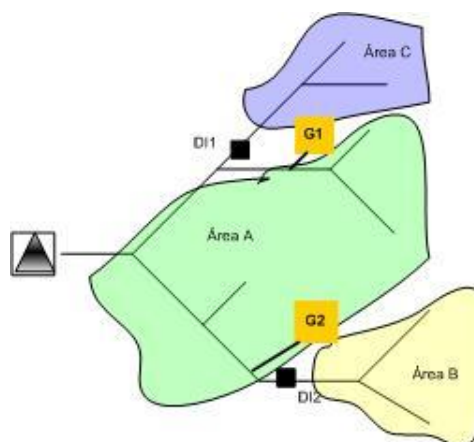


Figura 4-1: Fiabilidade em redes de distribuição integrando geração distribuída.

Assim, considerando esta rede, os troços que contribuem para a indisponibilidade do G1 e G2, são os da área A. Os troços nas áreas B e C não contribuem porque em caso de defeito são colocados fora de serviço através dos dispositivos de interrupção DI1 e DI2. O calculo da indisponibilidade da GD considera a taxa de defeitos médio e o tempo médio de cada defeito de todos os troços da área A que afetam a GD. Duas aproximações foram consideradas nesta abordagem multiobjectiva. Na primeira abordagem para além da minimização do custo dos equipamentos e dos índices de fiabilidade da rede (SAIDI e SAIFI) foi proposto um novo índice, *Distributed Generation Unavailability Index* (DGUI), para a terceira função objetivo a ser minimizada, que considera a indisponibilidade dos geradores. Na segunda abordagem dois novos índices compostos foram desenvolvidos, considerando a fiabilidade da rede e a indisponibilidade da GD. Nesta abordagem em vez de três funções objetivo a serem minimizadas, apenas duas funções objetivo foram consideradas. Estas duas funções objetivo integram a GD na fiabilidade da rede. Nestas abordagens, a primeira minimiza diretamente a indisponibilidade da GD e na segunda a indisponibilidade da GD é minimizada indiretamente através dos índices compostos de fiabilidade da rede.

#### 4.3.1 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJECTIVO BASEADO EM TRÊS FUNÇÕES OBJETIVO

Nesta abordagem, são definidas três funções objetivo que serão minimizadas ao mesmo tempo [98]. Como primeira função objetivo foi considerado um índice de fiabilidade de rede (SAIDI ou SAIFI), sendo a segunda associada ao custo dos equipamentos de interrupção. A terceira função objetivo considera o índice *Distributed Generation Unavailability Index* (DGUI), que representa a indisponibilidade da GD ligada à rede. Considerando que os geradores com maior potência têm uma maior impacto na rede, foram incluídos pesos para diferenciar a potência de cada um face ao total. Deste modo, as soluções obtidas privilegiam a ligação à rede dos geradores de maior potência relativamente aos de menor potência, diminuindo a indisponibilidade dos primeiros relativamente aos segundos. Uma vez que os índices de fiabilidade SAIDI e SAIFI são os índices mais utilizados pelas empresas elétricas, esta abordagem foi dividida em duas partes, cada uma delas considerando as seguintes funções objetivo: DGUI, CE, SAIDI na parte A e DGUI, CE, SAIFI na parte B.

*Função Objetivo SAIDI:* Nesta função objetivo o índice SAIDI é adaptado para considerar os diferentes tipos de dispositivos de interrupção. É calculada através da soma de todas as interrupções em minutos ou horas, multiplicado pelo número de clientes afetados por estas interrupções e divididas pelo número total de clientes ligados à rede. Este índice é dado pela equação (3-4).

*Função Objetivo SAIFI:* Nesta função objetivo o índice SAIFI é adaptado para considerar os diferentes tipos de dispositivos de interrupção. É calculada através da soma de todas as interrupções, multiplicado pelo número de clientes afetados por estas interrupções, dividido pelo número total de clientes ligados à rede. Este índice é dado pela equação (3-5).

*Função Objetivo CE:* Nesta função objetivo considera-se o custo de todos os dispositivos de interrupção. Relaciona-se com o custo dos equipamentos e instalação dos dispositivos de interrupção, diferenciados entre dois tipos de equipamentos: disjuntores e interruptores. A formulação matemática desta função é dada pela equação (3-6).

*Função Objetivo DGUI:* Este trabalho considera a fiabilidade das redes de distribuição incorporando a GD, sem operação em ilha. De acordo com este princípio esta função objetivo foi definida de forma a otimizar a disponibilidade de ligação à rede da GD. Deste modo, esta função estará associada a um índice que representará a soma da indisponibilidade de ligação de cada gerador à rede de distribuição. Este índice é calculado considerando o tempo médio de interrupção de cada seção que afeta um determinado gerador. O tipo de cada dispositivo de interrupção que afeta a seção  $i$  é também considerado, tendo em conta as equações (3-1), (3-2) e (3-3). De acordo com estes critérios, o índice que será designado por *Distributed Generation Unavailability Index* (DGUI), sendo a função objetivo calculada a partir da seguinte expressão:

$$\min DGUI = \min \sum_m \left( \left( \frac{P_{Gm}}{P_T} \right) \times \sum_i ((\lambda_i \times t_{Si}) + (\gamma_i \times t_{Ri}) + (\beta_i \times t_{Ni})) \right) \quad (4-1)$$

Onde  $P_{Gm}$  é a potência do gerador  $m$ ,  $P_T$  é a potência total de todos os geradores ligados à rede,  $t_{iS}$  é o tempo médio de interrupção da seção  $i$  que afeta o gerador  $m$  com um

interruptor a afetar a seção  $i$ ,  $t_{iR}$  é o tempo médio de interrupção da seção  $i$  que afeta o gerador  $m$  com um disjuntor a afetar a seção  $i$ ,  $t_{Ni}$  é o tempo médio de interrupção da seção  $i$  que afeta o gerador  $m$  sem nenhum dispositivo de interrupção na seção  $i$ ;

#### 4.3.2 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJECTIVO BASEADA EM ÍNDICES COMPOSTOS

Nesta abordagem apenas foram consideradas duas funções a serem minimizadas. Para reduzir o número de funções de três para duas, propõe-se um novo índice, designado de composto, onde se integra a fiabilidade da rede e a indisponibilidade da GD [98]. Para integrar a indisponibilidade da GD nos índices de fiabilidade SAIDI e SAIFI, cada gerador é representado por um determinado número de clientes, ligados a uma seção  $i$ . O número de clientes que representa cada gerador é dado pela seguinte equação:

$$N_{DGm} = \frac{P_{DGm}}{P_{AVcons}} \quad (4-2)$$

Onde  $N_{DGm}$  é o número de consumidores que representa o gerador  $m$ ,  $P_{DGm}$  é a potência do gerador  $m$ ,  $P_{AVcons}$  é potência média de um cliente na rede de distribuição.

Como os índices de fiabilidade são influenciados pelo número de clientes afetados por um defeito, a representação de cada gerador por um determinado número de clientes, fará com que o índice composto de fiabilidade privilegie as seções com maior número de clientes em detrimento de seções com menor número de clientes. A representação dos geradores por um número de clientes ligados a uma seção (à seção em que o gerador está ligado) permite integrar a GD nos índices de fiabilidade SAIDI e SAIFI, dando então origem a dois índices compostos. Como o número de clientes que representa cada gerador é tanto maior quanto maior for a sua potência, esta representação também permite diferenciar entre os geradores maiores e os menores. Tal como na primeira abordagem, duas análises foram também consideradas, uma minimizando o designado índice composto  $CI_{SAIDI-DG}$  (relacionado com o índice SAIDI) e o custo do equipamento  $CE$  e outra minimizando o índice composto  $CI_{SAIFI-DG}$  (relacionado com o índice SAIFI) e o custo do equipamento  $CE$ .

*Função Objetivo  $CI_{SAIDI-DG}$* : Esta função objetivo é baseada na expansão do índice SAIDI definido no Standard 1366 do IEEE [13] de modo a acomodar a GD ligada à rede de distribuição. De acordo com esta abordagem, cada gerador será representado como um número equivalente de clientes ligado à rede, proporcional à sua potência de acordo com a equação (4-2). Assim de acordo com este princípio, e tendo em consideração as equações (3-1), (3-2) e (3-3), este índice será descrito pela seguinte expressão:

$$\min CI_{SAIDI-DG} = \min_i \frac{\sum ((\lambda_i \times t_{Si} \times (N_i + N_{DGmi})) + (\gamma_i \times t_{Ri} \times (N_i + N_{DGmi})) + (\beta_i \times t_{Ni} \times (N_i + N_{DGmi})))}{\left( N_t + \sum_m N_{DGmi} \right)} \quad (4-3)$$

Onde  $t_{Si}$  é o tempo médio de interrupção na seção  $i$ , com um interruptor a afetar a seção  $i$ ,  $t_{Ri}$  é o tempo médio de interrupção na seção  $i$ , com um disjuntor a afetar essa seção  $i$ ,  $t_{Ni}$  é o tempo médio de interrupção da seção  $i$  que afeta o gerador  $m$  sem nenhum dispositivo de interrupção na secção  $i$ ,  $N_i$  é o número de clientes na seção  $i$ ,  $N_t$  é o número total de clientes na rede,  $N_{DGmi}$  é o número de consumidores que representam o gerador  $m$ .

*Função Objetivo  $CI_{SAIFI-DG}$* : À imagem do que se verificou na função objetivo anterior, para esta também é proposto uma expansão do índice SAIFI de modo a acomodar a GD ligada à rede de distribuição. Deste modo, o índice composto é dado pela seguinte expressão:

$$\min CI_{SAIFI-DG} = \min_i \frac{\sum ((\lambda_i \times f_i \times (N_i + N_{DGmi})) + (\gamma_i \times f_i \times (N_i + N_{DGmi})) + (\beta_i \times f_i \times (N_i + N_{DGmi})))}{\left( N_t + \sum_m N_{DGmi} \right)} \quad (4-4)$$

Onde  $f_i$  é a frequência média de defeito na seção  $i$ ,  $N_i$  é o número de clientes na seção  $i$ ,  $N_t$  é o número total de clientes na rede,  $N_{DGmi}$  é o número de consumidores que representam o gerador  $m$ .

*Função Objetivo CE:* O custo do Equipamento é a segunda função objetivo relacionada com o investimento em dispositivos de interrupção e sua instalação. Esta função objetivo é idêntica à descrita na primeira abordagem, sendo expressa pela função (3-6).

Nesta abordagem, para representar os resultados obtidos usando três funções objetivo, foi realizado um processo sequencial, representado na Figura 4-2.



Figura 4-2: Processo para obter as três funções SAIDI/SAIFI, DGUI e EC a partir dos índices compostos.

Inicialmente é obtida uma fronteira de Pareto com a aplicação de um algoritmo de otimização multiobjective considerando a minimização das duas funções objetivo  $CI_{SAIDI-DG}/CE$  ou  $CI_{SAIFI-DG}/CE$  dependendo da opção. Para cada solução da fronteira de Pareto está associado um tipo, número e localização de dispositivos de interrupção, que posteriormente serão utilizados para determinar os índices SAIDI, SAIFI, CE e DGUI. Deste modo, embora se minimize apenas duas funções, é possível obter uma relação entre os resultados obtidos e as três funções objetivo da primeira abordagem. Sob este ponto de vista alguns resultados poderão estar fora da fronteira de Pareto pelo que uma nova fronteira de Pareto terá de ser calculada tendo em consideração as três funções objetivo, ou seja, as soluções que não são dominadas de acordo com as três funções objetivo serão retiradas. No final deste processo, será possível obter uma nova fronteira de Pareto com um conjunto de soluções que considera as três funções objetivo. Ambas representam as funções SAIDI, CE, DGUI, e SAIFI, CE, DGUI, dependendo da opção.

#### 4.4 AMBIENTE E ENF EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO INTEGRANDO RECURSOS DE ENERGIA RENOVÁVEIS.

Com os desafios que a geração de energia elétrica enfrenta devido à utilização de combustíveis fósseis, a geração distribuída utilizando energia renovável (ex. eólicas,

fotovoltaicos, biogás e armazenamento de energia) têm-se tornado uma opção dominante nos sistemas de energia elétricos. Estas fontes de energia renováveis prometem um aumento na fiabilidade da geração de energia devido à sua natureza inesgotável e uma redução nas emissões de gases de efeito de estufa. Ao serem não poluentes e substituírem (em parte) as tradicionais fontes de geração de energia elétrica, reduzem as emissões de gases de efeito de estufa [99]. Deste modo, torna-se importante integrar a GD renovável, assim como reconfigurar as redes de distribuição para otimizar os benefícios anteriormente referidos [100]. Neste contexto a correta escolha do número, tipo e localização de dispositivos de interrupção nas redes de distribuição contribui para reduzir a indisponibilidade da GD renovável após um defeito na rede, reduzindo-se assim as emissões de gases com efeito de estufa. Por outro lado, obtêm-se ainda um aumento da eficiência energética com a redução da energia não fornecida. A determinação do número, tipo e localização de dispositivos de interrupção nas redes de distribuição, também é abordado de modo a considerar as seguintes funções objetivo a serem minimizadas: 1) redução das emissões de efeito de gases de estufa (REGEE); 2) energia não fornecida (ENF); e 3) investimento em equipamento (CE).

*Função Objetivo Redução Gases Efeito Estufa (RGEE):* As emissões de gases de efeito de estufa estão relacionadas com a energia consumida pelos consumidores, considerando que esta foi gerada a partir do conjunto das centrais existentes no sistema electroprodutor. Esta função objetivo considera a redução nos gases de efeito de estufa, obtida com substituição da geração de eletricidade por energias renováveis em vez do conjunto do sistema electroprodutor. A formulação matemática desta função objetivo, que considera as equações (3-1), (3-2) e (3-3), é descrita pela seguinte expressão:

$$RGEE = \left( -E_{MIXGRID} \times \sum_m P_{GER_m} \times (DG_{ini} - DG_{un}) \right) \quad (4-5)$$



sendo:

$$DG_{un} = \sum_m \left( \sum_i ((\lambda_i \times t_{Si}) + (\gamma_i \times t_{Ri}) + (\beta_i \times t_{Ni})) \right) \quad (4-6)$$

Onde  $E_{Mix\ Grid}$  são as emissões do sistema electroprodutor (em equivalente kgCO2/kWh),  $P_{Ger_m}$  é a potência do gerador  $m$ ,  $DG_{ini}$  é a indisponibilidade inicial da geração distribuída (rede sem DI),  $DG_{un}$  é a indisponibilidade da geração distribuída,  $t_{Si}$  é tempo médio de defeito da seção  $i$  que afeta o gerador  $m$  com um interruptor a afetar a seção  $i$ ,  $t_{Ri}$  é tempo médio de defeito da seção  $i$  que afeta o gerador  $m$  com um disjuntor a afetar a seção  $i$ ,  $t_{Ni}$  é taxa de defeito da seção  $i$  que afeta o gerador  $m$  sem nenhum dispositivo de interrupção a afetar a seção  $i$ .

*Função Objetivo: Energia Não Fornecida (ENF):* A minimização da energia não fornecida é a segunda função objetivo considerada nesta otimização. Esta está relacionada com energia que os clientes não recebem por existência de defeitos na rede. A formulação desta função objetivo, que considera as equações (3-1), (3-2) e (3-3) o tipo de dispositivo de interrupção, é dada pela seguinte expressão:

$$ENF = \sum_i ((\lambda_i \times t_{Si}) + (\gamma_i \times t_{Ri}) + (\beta_i \times t_{Ni})) \times P_i \quad (4-7)$$

*Função Objetivo CE:* O custo do Equipamento é a terceira função objetivo e está relacionada com o investimento em dispositivos de interrupção. Esta função objetivo é idêntica à equação (3-6).

#### 4.5 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

Tendo em conta os resultados obtidos no capítulo anterior, para a otimização das funções objetivo especificadas nos dois pontos anteriores, foi desenvolvido um algoritmo

memético do tipo M2, tal como descrito no ponto 3.6. Esta variante M2 possui uma estrutura de um algoritmo memético não padronizada, dado que a procura local é aplicada antes das operações genéticas (Figura 3-9) [101]. Para além da codificação do problema já descrito no ponto 3.5, para a otimização da colocação de dispositivos de interrupção em redes de distribuição integrando a geração distribuída, o desenvolvimento do algoritmo do tipo memético M2 aplicado nesta otimização, teve em conta a codificação da posição da geração distribuída na rede e a sua potência. Esta codificação considera o número do nó onde está ligada a geração distribuída assim como a potência dessa geração distribuída. O desenvolvimento do algoritmo possibilita a colocação da GD em qualquer nó da rede de distribuição. Neste algoritmo para além de se determinar os índices de fiabilidade tendo em conta toda a rede também é determinada a indisponibilidade dos geradores na rede de distribuição. Este cálculo tem em conta a potência de cada gerador, havendo portanto uma discriminação entre os diversos, privilegiando-se os de maior potência face aos de menor. De acordo com o problema, as variáveis de decisão são o tipo de dispositivo de interrupção e a sua localização na rede de distribuição, tendo sido estas variáveis já descritas nas funções (3-1), (3-2) e (3-3). A população inicial é inicializada aleatoriamente, tendo-se utilizado tal como anteriormente uma população inicial de 100 indivíduos. Cada indivíduo corresponde a um vetor, onde cada elemento corresponde a um nó da rede de distribuição. Dentro de cada elemento do vetor será colocado um número inteiro, “0”, “1” ou “2”, correspondendo o “0” a um nó sem dispositivo de corte, o “1” a um dispositivo de interrupção do Tipo 1 e o “2” a um dispositivo de interrupção do Tipo 2. A geração dos “filhos” tem em conta as operações genéticas de recombinação e mutação. Tal como anteriormente, para a recombinação foi utilizado o ponto médio para a divisão dos “pais” e para a mutação manteve-se a taxa de mutação de 1%.

#### 4.6 ESTUDO DE CASO

De modo a analisar as abordagens propostas, apresenta-se nesta secção resultados obtidos após a aplicação destas abordagens, a uma rede de distribuição radial de 94 nós. Esta rede é idêntica à utilizada no capítulo anterior, no entanto foi adaptada para incluir a GD. Neste caso de estudo, a potência e a localização da GD é apresentada na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Potência da GD e respetiva secção de ligação à rede de distribuição Radial

Potência [kW]	Secção de ligação da GD à rede
350	15
550	26
800	60
1150	77

#### 4.6.1 MELHORIA DA FIABILIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO INTEGRANDO GD

Neste ponto apresenta-se os resultados obtidos relativamente à otimização multiobjectivo dos índices de fiabilidade tendo em consideração a integração da GD. Para este caso de estudo, testou-se as duas abordagens propostas, nomeadamente por um lado, através da utilização dos índices de fiabilidade e disponibilidade da GD, e por outro, através da utilização dos índices compostos. Os resultados obtidos com a abordagem que considera as três funções objetivo são apresentados na Figura 4-3. Estes resultados apresentam as soluções da fronteira de Pareto, sendo apresentadas num plano 3D, em que cada plano representa uma função objetivo (DGUI, SAIDI e CE).

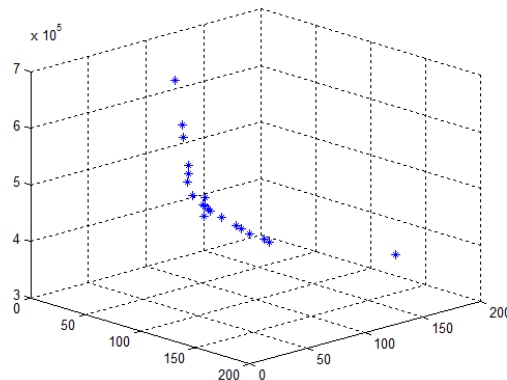


Figura 4-3: Soluções não denominadas obtidas a partir da aplicação do algoritmo considerando as funções objetivo DGUI, SAIDI e CE.

A Figura 4-4 apresenta a decomposição da representação 3D em duas representações 2D. Nesta figura a função objetivo *CE* é comum às duas representações. Deste modo os resultados são apresentados de acordo com as funções objetivo *DGUI* vs. *CE* e *SAIDI* vs. *CE*. A representação em 2D permite uma melhor perceção dos resultados e da fronteira de Pareto. Através desta figura verifica-se que existem algumas soluções dominadas.

Contudo as soluções que são dominadas tendo em consideração as funções objetivo DGUI vs. CE, são soluções não dominadas tendo em consideração as funções objetivo SAIDI vs. CE, e vice-versa.

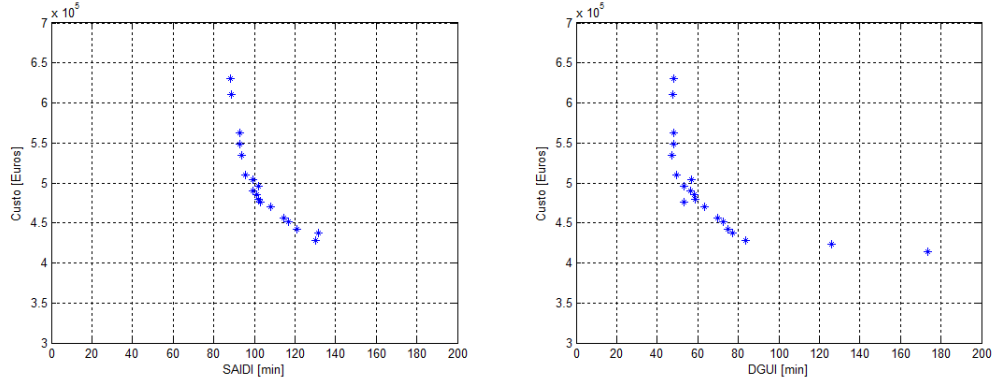


Figura 4-4: Visualização em 2D das soluções não dominadas obtidas com a aplicação do algoritmo, considerando as funções objetivo SAIDI vs. CE e DGUI vs. CE.

Relativamente à segunda abordagem, que utiliza os índices compostos, aplicou-se o mesmo algoritmo de otimização. Nesta abordagem, em vez de se utilizar três funções objetivo, serão apenas minimizadas duas funções, uma vez que se propôs um índice composto que integra o índice SAIDI e disponibilidade da GD. Da aplicação do algoritmo de otimização, obteve-se um conjunto de resultados que são um compromisso entre as duas funções objetivo, conforme se pode verificar pela Figura 4-5.

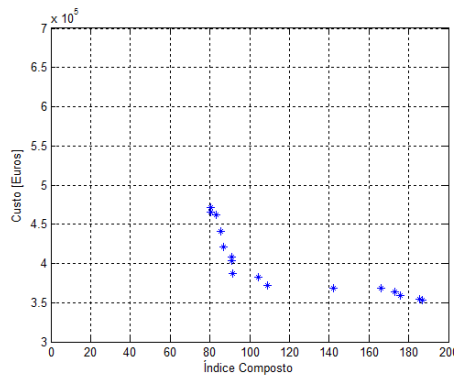


Figura 4-5: Soluções não dominadas considerando as funções objetivo  $CI_{SAIDI-DG}$  vs. CE.

Estes resultados comprovam que foi obtido uma fronteira de Pareto. No entanto, o número de soluções que define a fronteira de Pareto é ligeiramente inferior aos obtidos com a abordagem anterior. Tal como foi descrito anteriormente, os resultados da

minimização do índice composto  $CI_{SAIDI-DG}$  deverão ser decompostos nos índices DGUI e SAIDI. Assim, a partir do tipo, número e localização dos dispositivos de interrupção associados a cada solução da fronteira de Pareto, serão calculados os novos índices DGUI e SAIDI. Os resultados obtidos a partir desta decomposição são apresentados na Figura 4-6.

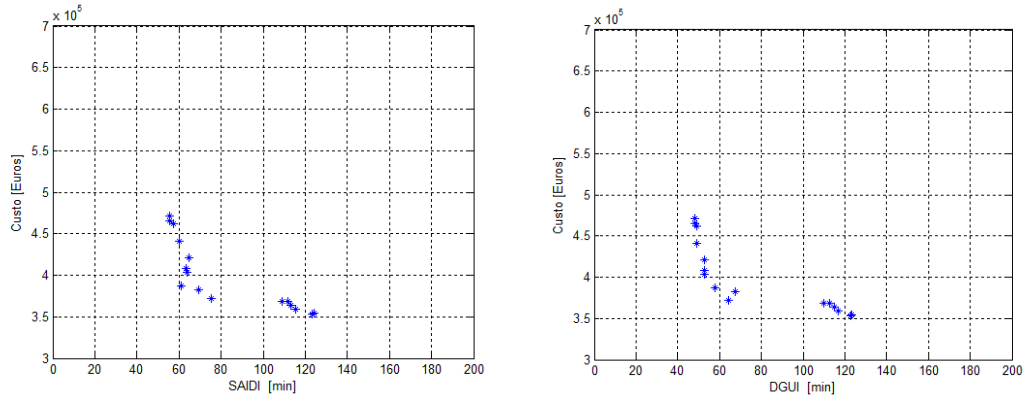


Figura 4-6: Decomposição dos resultados obtidos com a minimização do índice  $CI_{SAIDI-DG}$  em SAIDI vs. CE e DGUI vs. CE.

Dado que estes resultados foram obtidos a partir da minimização do índice composto  $CI_{SAIDI-DG}$ , algumas soluções da Figura 4-6 são dominadas por outras. Tal como descrito anteriormente, retirando estas soluções dominadas obtêm-se finalmente o conjunto de soluções de Pareto, de acordo com as três funções objetivo SAIDI, DGUI e CE. Na Figura 4-7 apresentam-se as respectivas soluções num plano tridimensional de modo a representar as três funções objetivo.

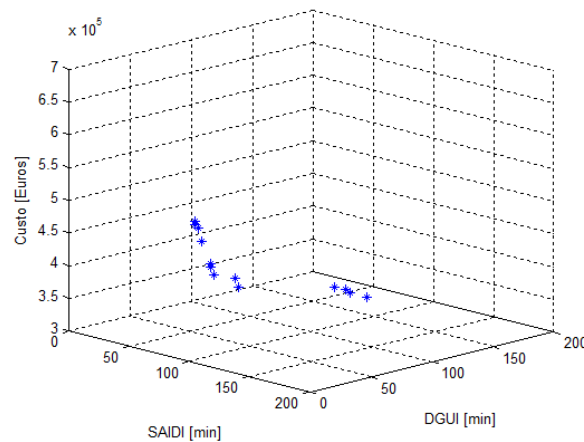


Figura 4-7: Visualização em 3D, dos resultados obtidos da fronteira de Pareto aos resultados da decomposição do índice  $CI_{SAIDI-DG}$ , nos índices DGUI, SAIDI e CE.

Através da comparação destes resultados com os da Figura 4-3, é possível verificar que foram obtidos melhores soluções com a aplicação da segunda abordagem. Os resultados da Figura 4-7 também são apresentados no espaço bidimensional conforme se pode verificar pelo Figura 4-8 onde se considera as funções objetivo SAIDI vs. CE e DGUI vs. CE. Desta representação é possível verificar que existem apenas soluções não dominadas.

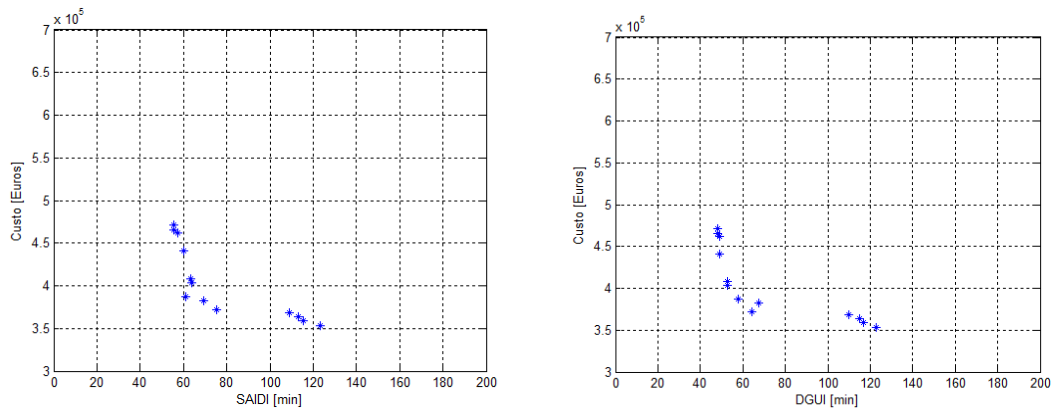


Figura 4-8: Decomposição dos resultados em 3D, de acordo com as funções objetivo SAIDI vs. CE e DGUI vs. CE.

Analisando a Figura 4-4 e a Figura 4-8 é possível comparar novamente os resultados obtidos com as duas abordagens realizadas. Destas figuras é possível confirmar que com a segunda abordagem são obtidos melhores resultados. Uma vez que a primeira abordagem minimiza três funções objetivo, os resultados aparentam tender para ótimos locais, sem conseguirem alcançar os resultados obtidos através da segunda abordagem, onde apenas duas funções foram minimizadas.

Na Tabela 4-2 são apresentados os valores de DGUI e SAIDI da rede existente (sem dispositivos de interrupção) e os melhores resultados obtidos para cada uma das funções objetivo, com a aplicação das duas abordagens. Analisando estes resultados, verifica-se que através da segunda abordagem obtiveram-se os menores valores para o índice SAIDI (55,4min) e para o custo de investimento em equipamentos (353.500€). De realçar que associado ao menor valor do índice SAIDI, também está o menor custo de investimento. Para o índice DGUI, o valor mínimo foi obtido através da aplicação da primeira abordagem (47,3min) embora associado a este valor esteja um custo de investimento superior (466.000€ para a segunda abordagem e 534.000€ para a segunda abordagem). Através destes resultados também é possível verificar que associado aos menores índices de fiabilidade SAIDI e DGUI, obtêm-se reduções de 85,6% e 87,7% respetivamente.

Tabela 4-2: Melhores resultados para cada uma das funções objetivo, obtidas com a aplicação das duas abordagens.

Descrição	Primeira Abordagem			Segunda Abordagem		
	SAIDI [min]	DGUI [min]	CE [Euros]	SAIDI [min]	DGUI [min]	CE [Euros]
Rede Existente	361,58	361,58	0	361,58	361,58	0
Mínimo SAIDI	<b>88,05</b>	48,41	630.500	<b>55,37</b>	48,07	471.000
Mínimo DGUI	93,93	<b>47,24</b>	534.000	55,52	<b>47,93</b>	466.000
Mínimo CE	265,34	173,31	<b>414.000</b>	123,10	122,74	<b>353.500</b>

**Nota:** O negrito representa os valores mínimos de cada função objetivo.

Na Tabela 4-3 são apresentados a localização dos dois tipos de dispositivos de corte para os resultados considerados na Tabela 4-2, tendo em consideração as soluções de maior e menor custo (para a primeira e segunda abordagem). Como se pode verificar, as soluções de maior custo possuem maior número de dispositivos de corte e entre elas, maior número de dispositivos de corte do tipo 2. Verifica-se também que na primeira abordagem o número de dispositivos de interrupção é maior relativamente aos obtidos pela segunda abordagem.

Tabela 4-3: Número e localização dos dispositivos de interrupção para as soluções extremas considerando a função objetivo CE.

SAIDI [min]	DGUI [min]	Custo (€)	Localização dos Dispositivos de Interrupção
Primeira Abordagem			
265,34	173,31	414.000	3,5,6, <b>7,9</b> ,10,11,13,14,15,17,19,20, <b>21</b> ,23,25,27, <b>30</b> ,31, <b>33</b> ,34,35,38, <b>40</b> ,42, <b>44</b> ,45,46,47,51,52,54,56,57,59,60,61,62,64,66,67, <b>68</b> ,71,73, 77,78, <b>80</b> ,81, <b>82</b> ,84,85,86,87,89, <b>90</b> ,91,92, <b>93</b> ,94 [12 do tipo 2 e 47 do tipo 1, total 59]
88,05	48,14	630.500	<b>2</b> , <b>3</b> ,6,7,8, <b>9</b> , <b>10</b> ,11,12,12,13,14,16, <b>18</b> ,20,21,22, <b>24</b> , <b>25</b> ,27,28, <b>31</b> ,32,3 3,34,35, <b>37</b> , <b>41</b> ,42, <b>43</b> ,44, <b>45</b> ,46,47,48, <b>49</b> , <b>50</b> ,51, <b>54</b> ,55,57,58, <b>59</b> , <b>60</b> , <b>6</b> <b>1</b> , <b>63</b> ,64,65,66,67, <b>68</b> , <b>69</b> , <b>70</b> ,71,72, <b>73</b> ,77,78,80,81, <b>82</b> ,83,84,85, <b>86</b> ,8 7,88, <b>89</b> , <b>90</b> , <b>91</b> ,93 [29 do tipo 2 e 42 do tipo 1, total 71]
Segunda Abordagem			
123,10	122,74	353.500	2,3,6,7,9,10,11,12,15,17,18, <b>19</b> ,20, <b>22</b> , <b>27</b> ,29,32,33, <b>34</b> ,37, <b>38</b> , <b>39</b> ,41, 42,44,48,52,53,54,56,57, <b>61</b> ,63,65,67, <b>74</b> , <b>76</b> ,78, <b>79</b> ,82,85, <b>87</b> ,91, <b>92</b> , 93 [13 do tipo 2 e 32 do tipo 1, total 45]
55,37	48,07	471.000	<b>2</b> ,6,7, <b>9</b> , <b>10</b> ,11,12,14,16, <b>17</b> , <b>18</b> ,20,21,22,25,26, <b>27</b> ,29, <b>31</b> ,32, <b>33</b> ,34,3 7,40,44,46,47,48,49, <b>50</b> ,51,54,57, <b>58</b> ,62,64,66,67, <b>69</b> , <b>71</b> ,74,76, <b>77</b> ,7 8, <b>80</b> ,81,82, <b>83</b> ,84, <b>85</b> ,86,87,88,89, <b>90</b> ,91,92,93,94 [18 do tipo 2 e 42 do tipo 1, total 60]

**Nota:** O negrito representa um nó com um dispositivo de corte de tipo 2.

Os testes que foram anteriormente descritos foram novamente efetuados para o mesmo caso de estudo, no entanto considerando o índice de fiabilidade SAIFI em vez do índice SAIDI. Assim, de seguida são apresentados os resultados obtidos pelo algoritmo de otimização considerando a primeira abordagem, ou seja, considerando as três funções objetivo DGUI, SAIFI e CE. A Figura 4-9 apresenta a fronteira de Pareto obtida utilizando esta abordagem. Conforme é possível verificar, os resultados são apresentados num espaço em 3D, onde cada plano representa uma função objetivo (DGUI, SAIFI e CE).

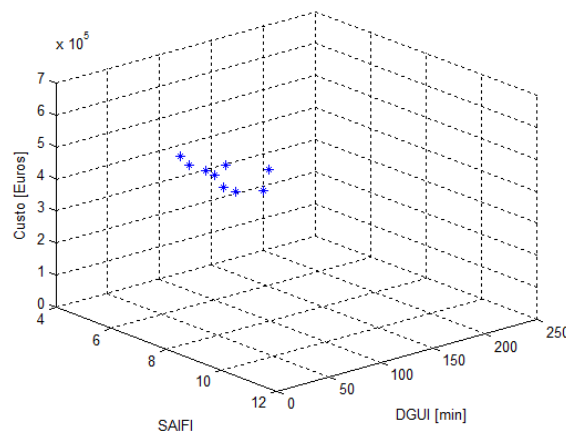


Figura 4-9: Soluções não denominadas obtidas a partir da aplicação do algoritmo considerando as funções objetivo DGUI, SAIFI e CE.

De modo a obter uma imagem mais pormenorizada dos resultados obtidos, efetuou-se a decomposição da representação em 3D em duas representações 2D, sendo estas novas representações apresentadas na Figura 4-10. Nesta figura a função objetivo CE é comum às duas representações. Deste modo os resultados são apresentados de acordo com as funções objetivo DGUI vs. CE e SAIFI vs. CE. Conforme é possível verificar e tal como esperado, a representação em 2D permite uma melhor perceção dos resultados e da fronteira de Pareto, sendo também possível verificar que não existe nenhuma solução dominada.



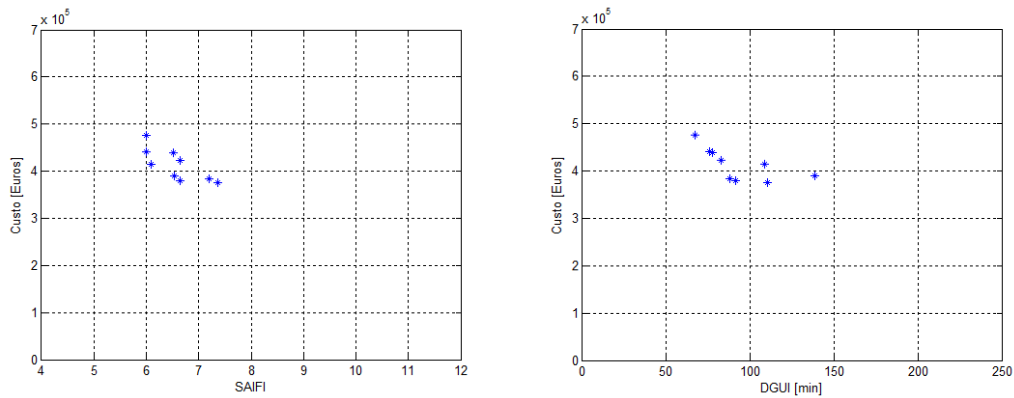


Figura 4-10: Visualização em 2D das soluções não dominadas obtidas com a aplicação do algoritmo, considerando as funções objetivo SAIFI vs. CE e DGUI vs. CE.

Na Figura 4-11 apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de otimização considerando (Memético M2) e de acordo com a segunda abordagem, onde apenas foram minimizadas duas funções objetivo,  $CI_{SAIFI-DG}$  vs.  $CE$ . Através destes resultados também é possível verificar que foi obtida uma fronteira de Pareto. Por outro lado, verifica-se que o número de soluções que define a fronteira de Pareto é claramente superior ao da primeira abordagem.

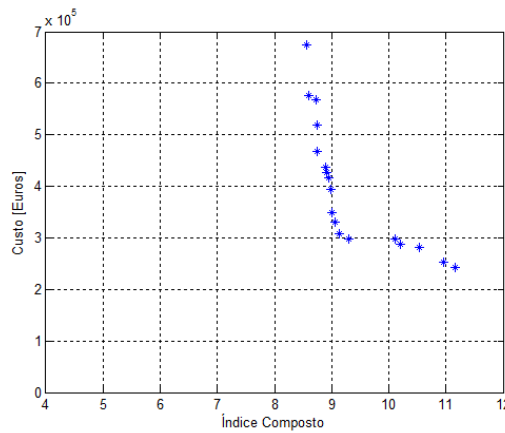


Figura 4-11: Soluções não dominadas considerando as funções objetivo  $CI_{SAIFI-DG}$  vs.  $CE$ .

De acordo com a sequência definida para a segunda abordagem, a partir dos resultados obtidos com a minimização do índice composto, foram calculados os índices SAIFI e CE. As soluções obtidas através da decomposição do índice  $CI_{SAIFI-DG}$  nos índices SAIFI vs. CE e DGUI vs. CE, são apresentadas na Figura 4-12. Tendo em consideração que estas soluções foram calculadas a partir da minimização índice composto  $CI_{SAIFI-DG}$ , passaram a existir algumas soluções dominadas.

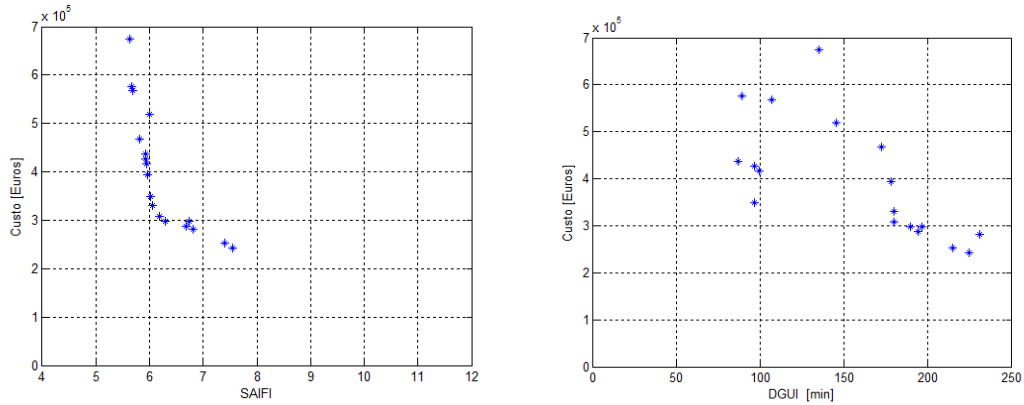


Figura 4-12: Decomposição dos resultados obtidos com a minimização do índice  $CI_{SAIFI-DG}$  em SAIFI vs. CE e DGUI vs. CE.

De forma a obter-se as fronteiras de Pareto tendo em consideração as três funções objetivo DGUI, SAIFI e CE, foram retiradas as soluções dominadas. Assim, a fronteira de Pareto tendo em consideração a segunda abordagem e as três funções objetivo descritas, é apresentada na Figura 4-13. Comparando estes resultados com os obtidos pela abordagem anterior (Figura 4-9), verifica-se que o número de soluções obtido é superior.

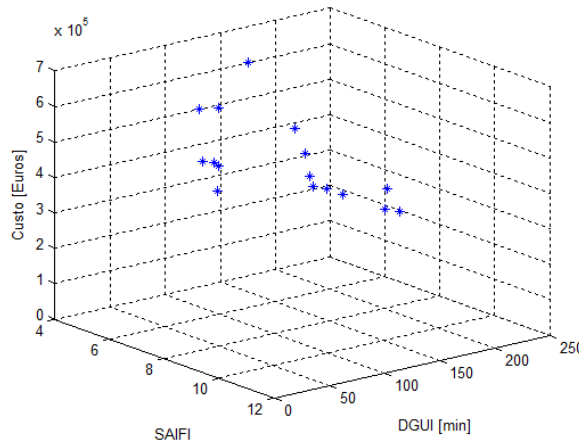


Figura 4-13: Visualização em 3D, dos resultados obtidos com a aplicação da fronteira de Pareto aos resultados da decomposição do índice  $CI_{SAIFI-DG}$ , nos índices DGUI, SAIFI e CE.

Para uma maior perceção dos resultados obtidos e possibilitar uma melhor comparação com os resultados da abordagem anterior, efetuou-se a decomposição dos resultados anteriores representados num espaço 3D, em duas representações num espaço 2D (Figura 4-14), considerando as funções objetivo SAIFI vs. CE e DGUI vs. CE.

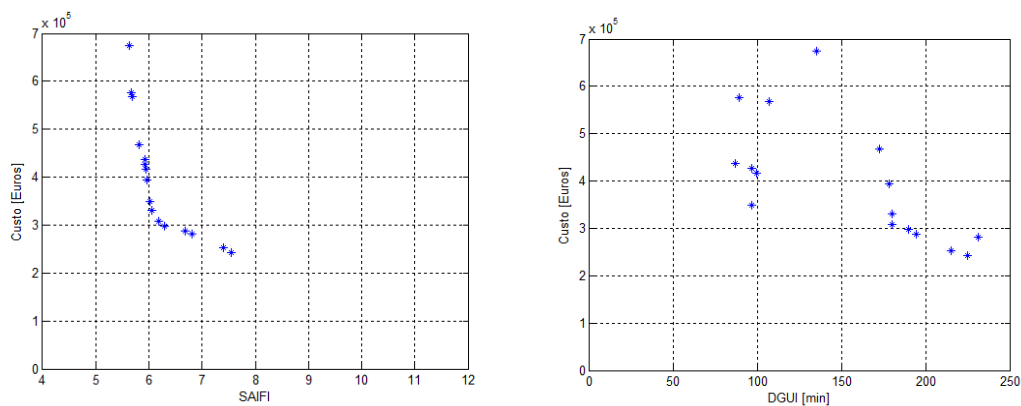


Figura 4-14: Decomposição dos resultados apresentados em 3D, de acordo com as funções objetivo SAIFI vs. CE e DGUI vs. CE

Comparando a Figura 4-10 com a Figura 4-14 é possível verificar que a segunda abordagem apresenta uma faixa mais alargada de soluções. Por outro lado, sob o ponto de vista do índice SAIFI, as soluções obtidas com a segunda abordagem são melhores que as obtidas na primeira abordagem. Relativamente ao índice DGUI verifica-se que para a primeira abordagem os resultados foram ligeiramente inferiores embora dentro de uma faixa muito restrita.

Os melhores resultados obtidos para cada função objetivo para as duas abordagens, assim como os valores de DGUI e SAIFI da rede existente (sem dispositivos de interrupção), são apresentados na Tabela 4-4.

Tabela 4-4: Melhores resultados para cada uma das funções objetivo, obtidas com a aplicação das duas abordagens

Descrição	Primeira Abordagem			Segunda Abordagem		
	SAIFI	DGUI [min]	EC [Euros]	SAIFI	DGUI [min]	EC [Euros]
Rede Existente	31,11	361,58	0	31,11	361,58	0
Mínimo SAIFI	<b>5,99</b>	75,79	442.000	<b>5,62</b>	135,01	674.500
Mínimo DGUI	6,00	<b>66,83</b>	476.000	5,92	<b>86,61</b>	436.000
Mínimo CE	7,35	110,50	<b>375.000</b>	7,55	224,75	<b>243.500</b>

**Nota:** O negrito representa os valores mínimos de cada função objetivo.

Destes resultados é possível verificar que para as funções objetivo SAIFI e CE a segunda abordagem apresenta melhores resultados. Analisando os resultados obtidos pelos algoritmos de otimização relativamente aos valores iniciais dos índices SAIFI e DGUI (rede sem qualquer tipo de dispositivo de interrupção), é possível verificar que se obtêm

melhorias de 81,5% e 80,2% para a primeira abordagem e 82,7% e 63,8% para a segunda abordagem. Também se verifica que para ambas as soluções extremas dos índices de fiabilidade, o custo é sempre inferior na segunda abordagem.

Na Tabela 4-5 são apresentados a localização dos dois tipos de dispositivos de corte para os resultados considerados na Tabela 4-4, para as soluções de maior e menor custo. Como seria de esperar, as soluções de maior custo possuem maior número de dispositivos de corte. Verifica-se também que relativamente à primeira abordagem, para a solução de maior custo obteve-se um menor número de dispositivos de interrupção, tanto para os do tipo 1 como para os do tipo 2. No entanto, embora a solução de maior custo obtida pela segunda abordagem seja superior à da primeira, este resultado está associado à maior diversidade da fronteira de Pareto.

Tabela 4-5: Número e localização dos dispositivos de interrupção para as soluções extremas considerando cada função objetivo.

SAIFI	DGUI [min]	Custo (€)	Localização dos Dispositivos de Interrupção
Primeira Abordagem			
7,35	110,50	375.000	2,3, <b>4,5</b> ,6,8, <b>11</b> ,12,13,15,21,24,25,26,28,31,32,33,36,37, <b>38</b> ,39, <b>40</b> ,42,43,45,46, <b>47</b> ,48,49,50,51, <b>53</b> ,55,58, <b>62</b> ,63,64,67,68,70,72 <b>74</b> ,75,76,78,79,80,82,83,84,86,89, <b>93</b> ,94 [10 do tipo 2 e 46 do tipo 1, total 56]
6,00	66,83	476.000	<b>2</b> , <b>4</b> ,6,7,8,9,10,11,14,17, <b>18</b> , <b>20</b> , <b>21</b> , <b>23</b> , <b>24</b> ,25,27,29, <b>30</b> ,34,35,37, <b>38</b> ,39,40,41,42,43,44, <b>46</b> ,48,49,50,51, <b>53</b> ,55, <b>58</b> , <b>62</b> ,63,64,67, <b>68</b> <b>71</b> ,72, <b>74</b> ,75,76,78,79,80, <b>81</b> ,82,83,84, <b>85</b> ,86,88,89,92,94 [18 do tipo 2 e 43 do tipo 1, total 61]
Segunda Abordagem			
7,55	224,75	243.500	2,6,8,12,13,15,19,20,23,24,26,27,28,32,34,36,37,41,44,45,47, 53,54,57,58, <b>60</b> ,61,62, <b>63</b> ,64,66,69, <b>73</b> ,74,75,78,82,84,85,87,90 94 [3 do tipo 2 e 40 do tipo 1, total 43]
5,62	135,01	674.500	<b>2</b> , <b>4</b> ,5,6,7,8,9, <b>10</b> ,11,12, <b>13</b> ,15,17, <b>18</b> ,19,20,21,22,23, <b>24</b> ,26,27,2 9, <b>30</b> , <b>31</b> , <b>32</b> ,33, <b>36</b> , <b>38</b> ,39,40,41,42, <b>43</b> , <b>44</b> , <b>45</b> , <b>46</b> ,47, <b>48</b> , <b>49</b> ,50,51, 53,54, <b>55</b> ,56, <b>57</b> , <b>58</b> ,59,60, <b>61</b> , <b>62</b> ,64,65, <b>66</b> ,68,69, <b>71</b> ,72, <b>73</b> , <b>74</b> ,75 <b>76</b> ,77,78, <b>79</b> ,80,81,82, <b>83</b> ,84,86,87,88,89, <b>91</b> , <b>92</b> [31 do tipo 2 e 45 do tipo 1, total 76]

**Nota:** O negrito representa um nó com um dispositivo de corte de tipo 2.

#### 4.6.2 AMBIENTE E REDUÇÃO DA ENF EM REDES DISTRIBUIÇÃO INTEGRANDO GD

Neste ponto são apresentados os resultados obtidos pela abordagem proposta para a otimização da fiabilidade da rede tendo como objetivo o ambiente e redução da ENF. Deste modo, as funções objetivo a considerar são a redução dos gases de efeito de estufa (RGEE), a energia não fornecida (ENF) e o custo de investimento em dispositivos de interrupção (CE) respetivamente descritas pelas equações (4-5), (4-7) e (3-6). Os resultados obtidos através desta abordagem são apresentados na Figura 4-15. Nesta figura apresentada em três dimensões, cada eixo representa cada uma das funções objetivo, RGEE, ENF e CE. Esta figura mostra uma fronteira de Pareto bem definida e com bastante diversidade.

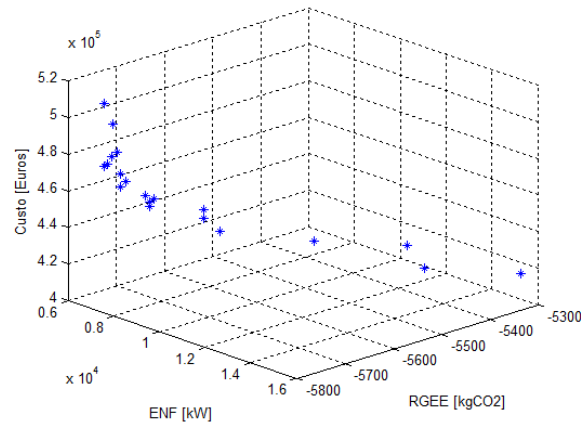


Figura 4-15: Soluções não dominadas obtidas com a aplicação do algoritmo Memético M2, considerando as funções objetivo RGEE, ENF e CE

Para uma melhor observação destes resultados, é apresentado na Figura 4-16 os resultados obtidos anteriormente num espaço a duas dimensões de acordo com as funções ENF vs. CE e RGEE vs. CE.

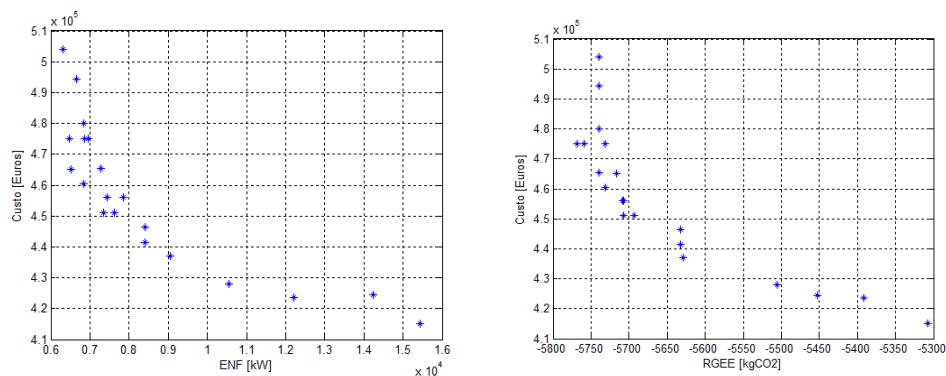


Figura 4-16: Decomposição dos resultados apresentados em 3D, de acordo com as funções objetivo ENF vs. CE e RGEE vs. CE.

Conforme é possível verificar pela figura Figura 4-16, tanto para as funções objetivo ENF vs. CE como para RGEE vs. CE, a fronteira de Pareto aparece bem definida. Os valores numéricos das soluções obtidas são apresentados na Tabela 4-11.

Na Tabela 4-6 são apresentados a localização dos dois tipos de dispositivos de corte para os resultados de maior e menor custo da Figura 4-15. Tal como esperado, as soluções de maior custo possuem maior número de dispositivos de corte.

Tabela 4-6: Número e localização dos dispositivos de interrupção para as soluções extremas considerando cada função objetivo.

ENS [kW x10 <sup>3</sup> ]	RGEE [kgCO <sub>2</sub> x10 <sup>3</sup> ]	Custo (€)	Localização dos Dispositivos de Interrupção
15.425,79	-5.307,46	415.000	<b>2,5,6,7,8,10,12,13,14,15,17,19,20,22,23,24,26,27,29,30,31,32,36,38,39,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,53,54,56,57,58,60,62,65,67,69,72,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,87,88,89,90,91,92</b> [10 do tipo 2 e 53 do tipo 1, total 63]
6.309,72	-5.738,98	504.000	<b>2,3,4,6,7,10,12,14,15,16,17,18,21,25,26,27,28,29,30,32,33,37,39,41,42,43,45,48,49,50,51,52,53,54,56,57,58,59,60,62,64,66,67,69,70,71,74,76,81,82,84,84,87,88,91,92,94</b> [20 do tipo 2 e 37 do tipo 1, total 57]

**Nota:** O negrito representa um nó com um dispositivo de corte de tipo 2.

## 4.7 ESCOLHA DE UMA SOLUÇÃO

Relativamente à análise das soluções e quanto à sua possível escolha esta será efetuada de acordo com as abordagens apresentada no capítulo anterior. Tal como referido, a escolha poderá ser feita pelo decisor onde as várias soluções também são apresentadas sob a forma de ganhos e reduções percentuais face às soluções vizinhas e pelo método “Min-Max”.

### 4.7.1 FIABILIDADE ASSOCIADA A REDES DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICAS

De acordo com a opção da escolha da solução pelo decisor, e no sentido de facilitar essa decisão, relativamente aos resultados obtidos pela primeira abordagem com a minimização das funções objetivo SAIDI, DGUI e CE e considerando os resultados da Figura 4-3, apresenta-se na Figura 4-17 a variação do investimento em equipamentos vs. a variação

dos índices SAIDI e DGUI face às soluções vizinhas. Através da análise da Figura 4-17 é possível verificar que a solução 3 é de grande interesse face às soluções anteriores, uma vez que com um aumento de investimento de 2,3% e 0,9% (soluções 2 e 3), obtêm-se reduções nos índices de fiabilidade, nomeadamente de 24,3% e 35,2% para o índice SAIDI e 27,0% a 33,5% para o índice DGUI, respetivamente para as soluções 2 e 3. Deste modo, conclui-se que estas soluções apresentam-se como uma opção de grande interesse face às soluções anteriores (1 e 2). De um modo não tão acentuado, mas em que se verificam ganhos importantes dos índices de fiabilidade face aos incrementos de custo são visíveis para as soluções 9 e 15. Por outro lado, as soluções 16, 19 e 20 têm um elevado acréscimo de custo face às soluções anteriores (de 4,8%, 8,4% e 3,3%), enquanto que os ganhos obtidos para o índice DGUI é de apenas 4,5%, 1,0% e 0,9% e para o índice SAIDI de 1,9%, 4,5% e -0,8% respetivamente para cada solução. Deste modo, estas soluções são pouco interessantes face às anteriores (15, 18 e 19).

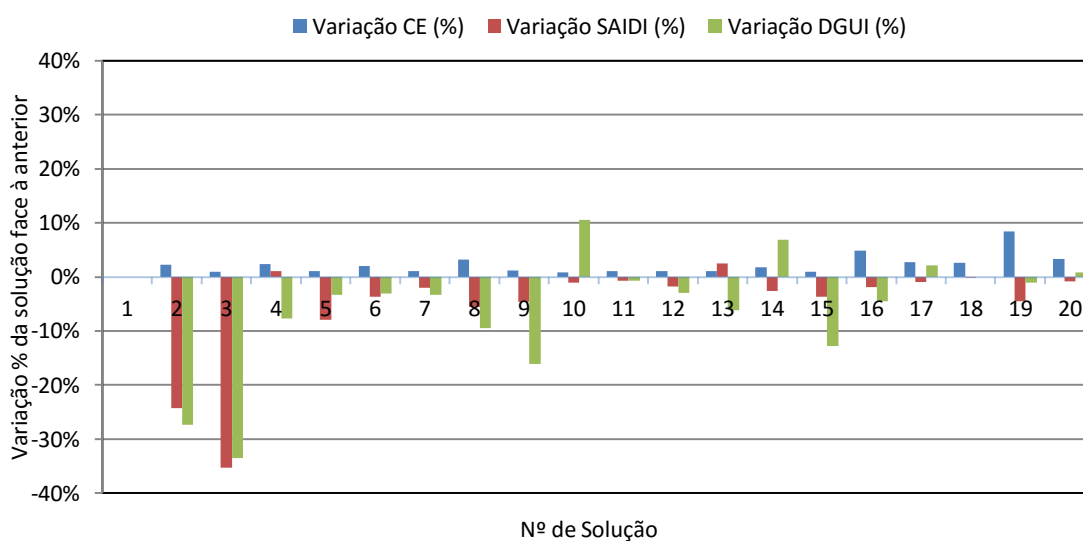


Figura 4-17: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIDI e DGUI, para os resultados obtidos para a primeira abordagem com a aplicação do algoritmo Memético M2.

Considerando a segunda abordagem, os resultados obtidos para as mesmas funções objetivo SAIDI, DGUI e CE (Figura 4-7), são apresentados na Figura 4-18 (e na Tabela 4-8 onde são numeradas e apresentados os valores numéricos de cada solução) a variação do investimento em equipamentos vs. a variação dos índices SAIDI e DGUI face às soluções vizinhas. Analisando a Figura 4-18, é possível verificar que as soluções 5 e 7 são de grande interesse face às soluções anteriores, uma vez que com um aumento de

investimento de 1,2% e 1,3% obtêm-se reduções do índice SAIDI de 30,7% e 11,6%, enquanto que para o índice DGUI obtêm-se reduções de 41,3% e 14,4% respectivamente para as soluções 5 e 7. Por outro lado, as soluções 10 e 11 apresentam um acréscimo de custos 8,1% e 4,5%, para uma redução do índice DGUI de 7,4% e -0,02% e para uma redução de apenas 5,5% e 4,0% para o índice SAIDI.

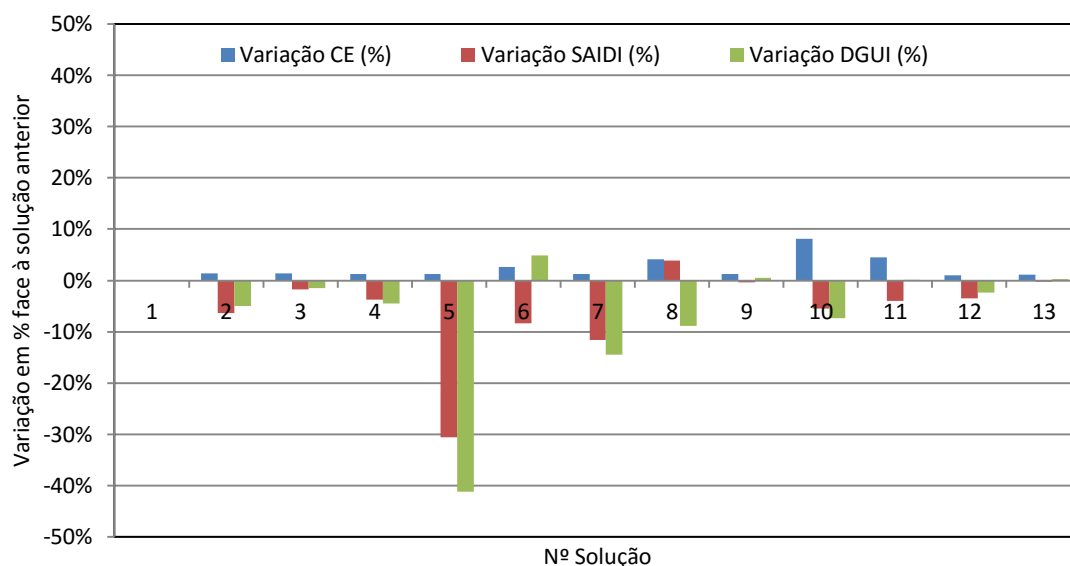


Figura 4-18: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIDI e DGUI, para os resultados obtidos para a segunda abordagem com a aplicação do algoritmo Memético M2.

Relativamente aos resultados obtidos pela primeira abordagem com a minimização das funções objetivo SAIFI, DGUI e CE e considerando os resultados da Figura 4-9, apresenta-se na Figura 4-19 a variação do investimento em equipamentos vs. a variação dos índices SAIFI e DGUI face às soluções vizinhas. Analisando a Figura 4-19, é possível verificar que as soluções 2 e 5 apresentam-se como interessantes face às anteriores, tendo em consideração o reduzido incremento de custo (1,2% e 6,3%) comparativamente aos ganhos dos índices de fiabilidade 9,6% e 6,8% para o SAIDI e 17,3% e 21,7% para o DGUI, respectivamente para as soluções 2 e 5. Tendo em conta o índice DGUI, a solução 6 também se apresenta como interessante, uma vez que para um acréscimo de investimento de 2,3%, obtêm-se um ganho neste índice de 23,9%. No entanto esta solução apresenta uma penalização de 9,1% sob o ponto de vista do SAIFI. A solução 4 apresenta-se muito penalizadora para o índice DGUI. De facto para um incremento de investimento 1,3%



apesar de existir um ganho de 9,23% para o índice SAIFI, existe um aumento no índice DGUI de 57,4%.

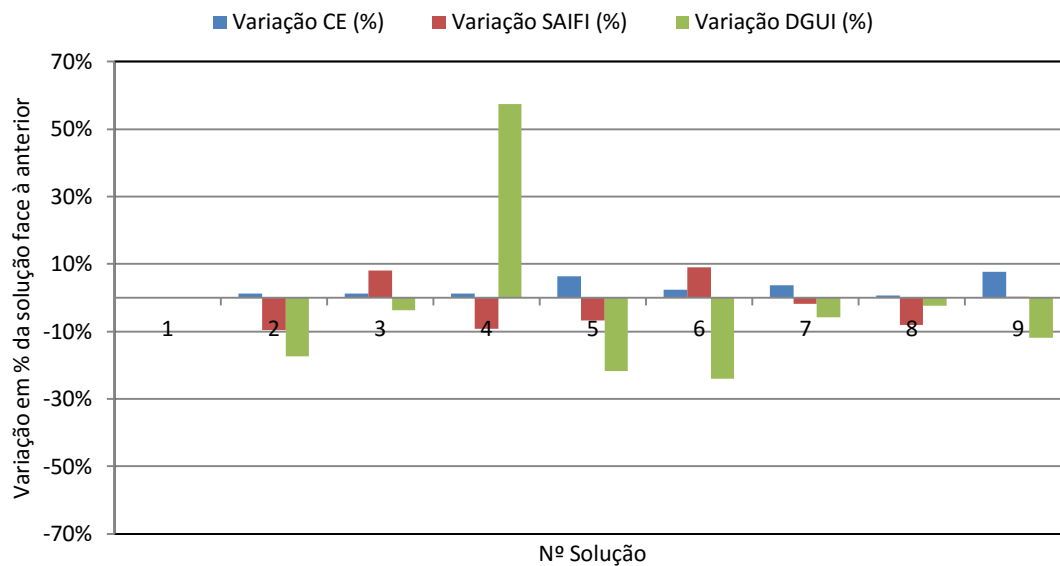


Figura 4-19: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIFI e DGUI, para os resultados obtidos para a segunda abordagem com a aplicação do algoritmo Memético M2.

Para a segunda abordagem considerando os resultados da Figura 4-13 respeitantes à minimização das funções objetivo SAIFI, DGUI e CE, apresenta-se na Figura 4-20 a variação do investimento em equipamentos vs. a variação dos índices SAIFI e DGUI face às soluções vizinhas. Analisando a Figura 4-20, e caso se considere apenas o índice DGUI, as soluções 8, 10 e 15 apresentam-se como muito interessante face às soluções anteriores, uma vez que para um acréscimo de custo de 5,1%, 5,7% e 1,7% é possível obter uma redução de 46,4%, 44,1% e 16,8% para este índice. Ainda sob o ponto de vista do índice DGUI, as soluções 9, 13 e 16 são especialmente desaconselhadas face às anteriores, uma vez que para além de existir um aumento no investimento (13,2%, 7,2% e 16,9%), este índice é fortemente penalizado com aumentos de 84,5%, 99,1% e 51,7%). Por outro lado, sob o ponto de vista do índice SAIFI verifica-se que não existem soluções preferíveis face a outras.

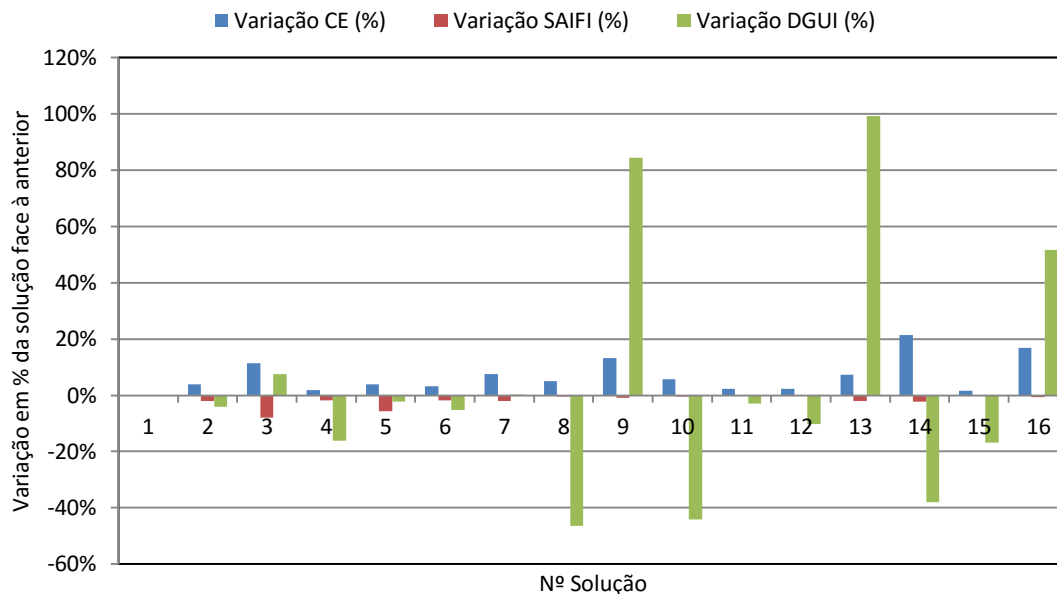


Figura 4-20: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIFI e DGUI, para os resultados obtidos para a segunda abordagem com a aplicação do algoritmo Memético M2.

Tendo agora em conta a segunda opção considerada anteriormente para a escolha de uma solução, para as funções objetivo SAIDI, DGUI e CE, e para a primeira abordagem referida anteriormente, os resultados obtidos pelo método “Min-Max” são apresentados na Tabela 4-7. Assim e de acordo com este método, a solução a adotar deverá ser a solução número 7.

Através da Figura 4-21 é possível verificar qual a localização sobre a fronteira de Pareto da solução a adotar de acordo com o método “Min-Max”. Como já foi referido no capítulo anterior, com a aplicação deste método pretendeu-se maximizar a escolha de uma solução, a partir de um conjunto de soluções (fronteira de Pareto) obtidas minimizando as funções objetivo de um problema multiobjectivo. Pela localização da solução adotada nos gráficos, verifica-se de um modo geral que elas se localizam próximas do vértice da fronteira de Pareto, que corresponde mais ou menos ao ponto central dessa fronteira.

Tabela 4-7: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2 considerando a primeira abordagem.

Nº Solução [i]	SAIDI [min]	DGUI [min]	CE [Euros]	SAIDI (i)	DGUI (i)	CE (i)	Min	Max
1	265,3482	173,3154	414.000	0,00	0,00	1,00	0,00	0,81
2	200,9720	125,9943	423.500	0,36	0,38	0,96	0,36	
3	130,1753	83,7482	427.500	0,76	0,71	0,94	0,71	
4	131,5694	77,2908	437.500	0,75	0,76	0,89	0,75	
5	121,0645	74,6935	442.000	0,81	0,78	0,87	0,78	
6	116,6426	72,3787	451.000	0,84	0,80	0,83	0,80	
7	114,3146	69,9619	456.000	0,85	0,82	0,81	0,81	
8	107,9171	63,3314	470.500	0,89	0,87	0,74	0,74	
9	102,9698	53,1356	476.000	0,92	0,95	0,71	0,71	
10	101,9212	58,7427	480.000	0,92	0,91	0,70	0,70	
11	101,1961	58,3577	485.000	0,93	0,91	0,67	0,67	
12	99,4055	56,6040	490.000	0,94	0,93	0,65	0,65	
13	101,9295	53,1356	495.500	0,92	0,95	0,62	0,62	
14	99,3324	56,7551	504.500	0,94	0,92	0,58	0,58	
15	95,7171	49,4864	509.500	0,96	0,98	0,56	0,56	
16	93,9366	47,2464	534.000	0,97	1,00	0,45	0,45	
17	93,0683	48,2411	548.500	0,97	0,99	0,38	0,38	
18	93,0271	48,2411	563.000	0,97	0,99	0,31	0,31	
19	88,8246	47,7548	610.500	1,00	1,00	0,09	0,09	
20	88,0566	48,1416	630.500	1,00	0,99	0,00	0,00	

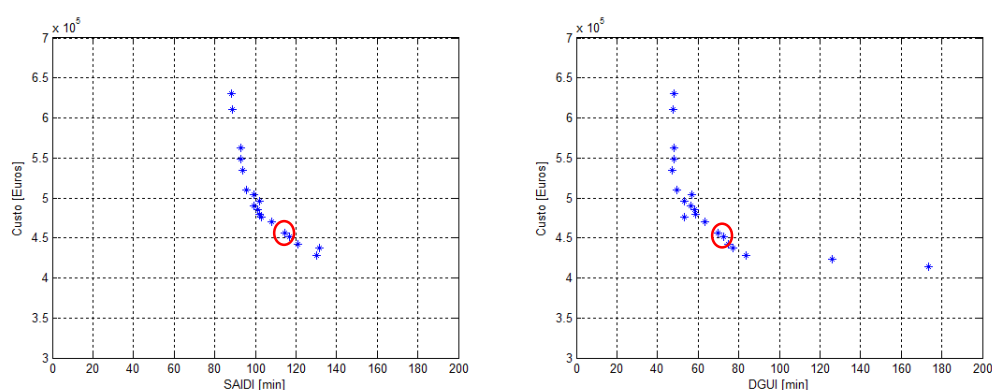


Figura 4-21: Solução adotada na primeira abordagem, pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIDI e CE vs. DGUI.

Analisando a solução obtida face aos resultados apresentados sob o ponto de vista da variação do investimento em equipamentos vs variação no SAIDI e DGUI (Fig. 4-17), verifica-se que este método não entra em consideração com esse fator. De facto, analisando

a solução selecionada face à anterior (6) verifica-se que existe um aumento nos custos de 1,1%, para apenas uma redução dos índices SAIDI e DGUI de 2,0% e 3,3% respetivamente. No entanto, analisando a solução seguinte (8) verifica-se que para um incremento de custo de 3,18% obtêm-se ganhos de nos índices de fiabilidade SAIDI e DGUI de 5,6% e 9,5% respetivamente, pelo que poderá ser interessante escolher antes esta solução. Assim, a utilização de ambos os métodos poderá ser uma mais-valia, uma vez que o decisor poderá eventualmente escolher uma solução vizinha utilizando a informação disponibilizada pela primeira opção, apresentada para a escolha de uma solução.

Para as mesmas funções objetivo mas agora considerando a segunda abordagem, os resultados obtidos de acordo com o método “Min-Max” são apresentados na Tabela 4-8. Através desta tabela é possível verificar que neste caso, a solução a adotar deverá ser a solução número 6.

Tabela 4-8: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2 considerando a segunda abordagem.

Nº Solução [i]	SAIDI [min]	DGUI [min]	CE [Euros]	SAIDI (i)	DGUI (i)	CE (i)	Min	Max
1	123,1065	122,7422	353.500	0,00	0,00	1,00	0,00	0,74
2	115,2172	116,6538	358.500	0,12	0,08	0,96	0,08	
3	113,1544	114,8843	363.500	0,15	0,11	0,91	0,11	
4	108,9227	109,7054	368.000	0,21	0,17	0,88	0,17	
5	75,5320	64,4201	372.500	0,70	0,78	0,84	0,70	
6	69,2511	67,5443	382.500	0,80	0,74	0,75	0,74	
7	61,2434	57,7995	387.500	0,91	0,87	0,71	0,71	
8	63,6499	52,6879	403.500	0,88	0,94	0,57	0,57	
9	63,4167	52,9848	408.500	0,88	0,93	0,53	0,53	
10	59,9305	49,0627	441.500	0,93	0,98	0,25	0,25	
11	57,5184	49,0722	461.500	0,97	0,98	0,08	0,08	
12	55,5276	47,9353	466.000	1,00	1,00	0,04	0,04	
13	55,3710	48,0774	471.000	1,00	1,00	0,00	0,00	

A Figura 4-22 apresenta a posição na fronteira de Pareto da solução a adotar de acordo com este método. À imagem do que se verificou no caso anterior, também nesta situação verifica-se que esta solução se encontra próximo do vértice da fronteira de Pareto.

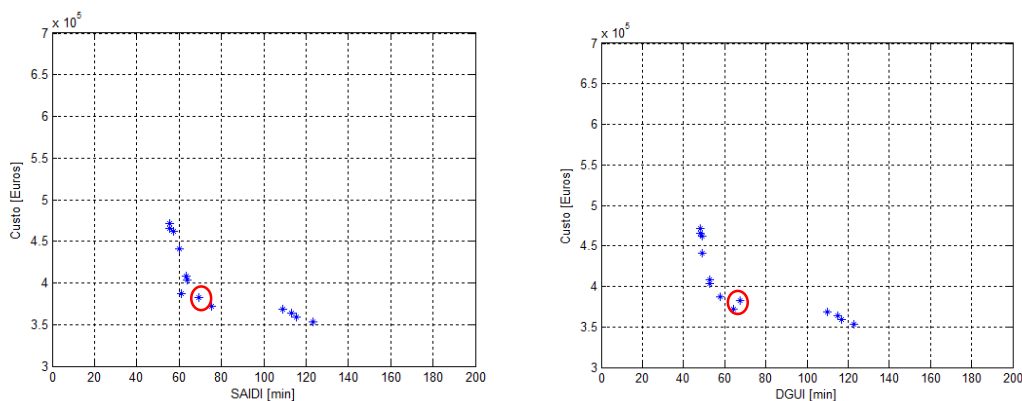


Figura 4-22: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIDI e CE vs. DGUI.

Comparando a solução obtida face aos resultados apresentados sob a forma de ganhos e reduções percentuais face às soluções vizinhas (Figura 4-18), verifica-se que a solução encontrada não se apresenta como de grande interesse face à solução anterior (5), uma vez que embora exista um ganho no índice SAIDI de 8,32% para um aumento de investimento de 2,7%, constata-se que o índice DGUI tem um agravamento de 4,9%. Relativamente à solução 5, esta é de grande interesse dado que para um aumento de investimento 1,2% obtêm-se para ganhos dos índices SAIDI e DGUI de 30,7% e 41,3%, respetivamente. A solução 7 também se apresenta como interessante, dado que para um aumento de investimento de 1,3%, obtêm-se ganhos de ambos os índices superiores a 10,0%.

Comparando as duas soluções obtidas a partir do método “Min-Max” para as duas abordagens, verifica-se que para a segunda abordagem se obteve a melhor solução. Também é possível verificar que para o índice DGUI, o ganho não é muito acentuado (3%). No entanto, para o índice SAIDI e CE obtiveram-se ganhos com alguma expressão, nomeadamente de 39,2% e 16,7%, respetivamente.

Para as funções objetivo SAIFI, DGUI e CE, e para a primeira abordagem, os resultados obtidos de acordo com o método “Min-Max” são apresentados na Tabela 4-9. Conforme é possível verificar, a solução a adotar deverá ser a solução número 6.

Tabela 4-9: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2 considerando a primeira abordagem.

Nº Solução [i]	SAIFI	DGUI [min]	CE [Euros]	SAIFI (i)	DGUI (i)	CE (i)	Min	Max
1	7,3585	110,5045	375.000	0,00	0,39	1,00	0,000	0,52
2	6,6543	91,3661	379.500	0,52	0,66	0,96	0,517	
3	7,1969	87,9287	384.500	0,12	0,71	0,91	0,119	
4	6,5329	138,4345	389.500	0,61	0,00	0,86	0,000	
5	6,0899	108,4035	414.000	0,93	0,42	0,61	0,419	
6	6,6427	82,4061	423.500	0,53	0,78	0,52	0,520	
7	6,5248	77,5882	439.000	0,61	0,85	0,37	0,366	
8	5,9956	75,7932	442.000	1,00	0,87	0,34	0,337	
9	6,0030	66,8332	476.000	0,99	1,00	0,00	0,000	

Na Figura 4-23 é apresentada a localização face à fronteira de Pareto, da solução a adotar de acordo com o método “Min-Max”. Tendo em consideração o carácter conflituoso das funções objetivo, e analisando apenas sob a perspectiva das funções CE vs. SAIFI, a solução adotada não se encontra na fronteira de Pareto. No entanto, através de uma análise em que se considere as três funções, verifica-se que o método tende a escolher uma solução próxima do vértice da fronteira de Pareto.

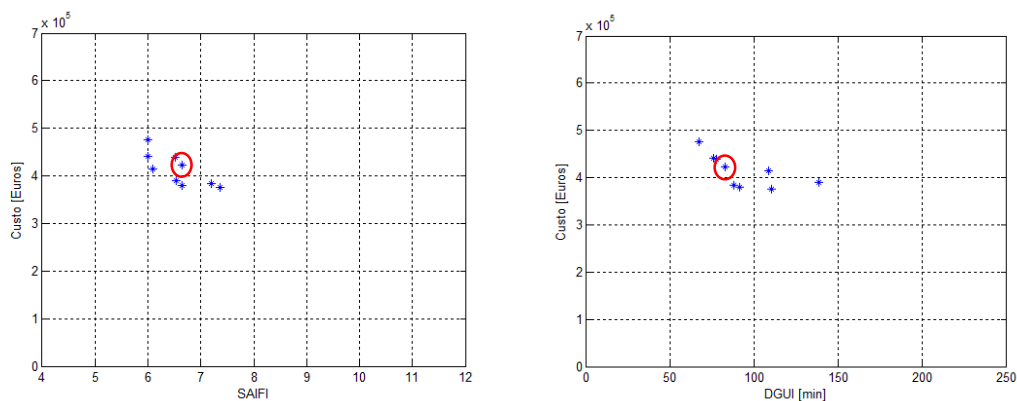


Figura 4-23: Solução adotada na primeira abordagem, pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIFI e CE vs. DGUI.

Através da análise desta solução com os resultados da Figura 4-19, é possível verificar que sob o ponto de vista de ambos os índices de fiabilidade, neste caso o que foi adotado

coincide com uma das soluções pouco interessantes apresentadas pelo anterior método de escolha. De facto, esta solução apresenta um ganho para o índice DGUI mas um agravamento no índice SAIFI. Neste caso o decisor, também pode verificar que a solução anterior poderá ser uma boa opção de escolha, dado que para um aumento de investimento de 6,3%, obtêm-se ganhos de 6,8% e 21,7% respetivamente para os índices SAIFI e DGUI, face à solução anterior. Já a solução 7 pode ser pouco interessante uma vez que para um aumento de investimento de 3,7%, obtêm-se apenas ganhos de 1,8% e 5,9%, respetivamente para os índices SAIFI e DGUI.

Para a segunda abordagem do algoritmo memético M2, os resultados obtidos de acordo com o método “Min-Max” são apresentados na Tabela 4-10. De acordo com este método de seleção, a solução a adotar deverá ser a solução número 8.

Tabela 4-10: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2 considerando a segunda abordagem.

Nº Solução [i]	SAIFI	DGUI [min]	CE [Euros]	SAIFI (i)	DGUI (i)	CE (i)	Min	Max
1	7,5521	224,7559	243.500	0,00	0,05	1,00	0,00	0,76
2	7,3917	215,3859	253.000	0,08	0,11	0,98	0,08	
3	6,8035	231,5559	282.000	0,39	0,00	0,91	0,00	
4	6,6813	194,4101	287.500	0,45	0,26	0,90	0,26	
5	6,2987	189,9759	298.500	0,65	0,29	0,87	0,29	
6	6,1824	180,1406	308.000	0,71	0,35	0,85	0,35	
7	6,0509	180,1969	331.500	0,78	0,35	0,80	0,35	
8	6,0261	96,5191	348.500	0,79	0,93	0,76	0,76	
9	5,9719	178,0917	394.500	0,82	0,37	0,65	0,37	
10	5,9501	99,4738	417.000	0,83	0,91	0,60	0,60	
11	5,9315	96,5191	426.500	0,84	0,93	0,58	0,58	
12	5,9236	86,6185	436.000	0,85	1,00	0,55	0,55	
13	5,8080	172,4812	467.500	0,91	0,41	0,48	0,41	
14	5,6801	106,9580	567.500	0,97	0,86	0,25	0,25	
15	5,6727	89,0064	577.000	0,98	0,98	0,23	0,23	
16	5,6297	135,0106	674.500	1,00	0,67	0,00	0,00	

Tendo em consideração a localização do conjunto de soluções da fronteira de Pareto na Figura 4-24 apresenta-se a solução adotada de acordo com este método. À imagem do que se verificou nos casos anteriores, verifica-se que esta solução também se encontra próxima do vértice da fronteira de Pareto.

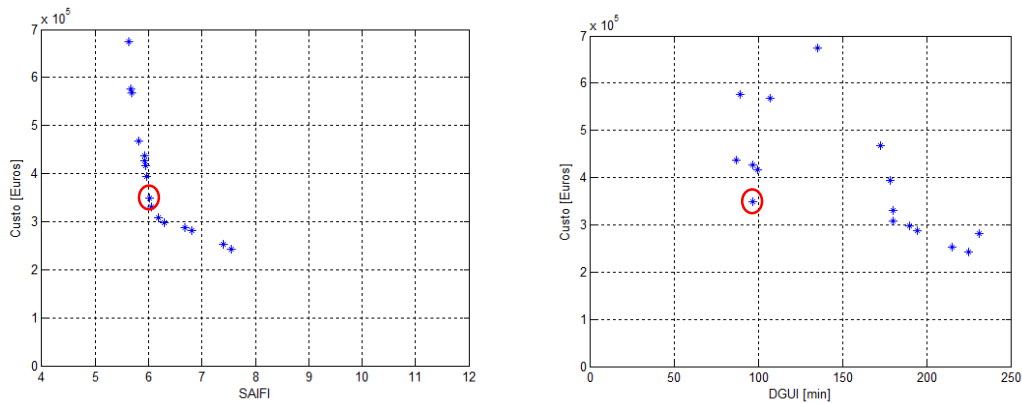


Figura 4-24: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIFI e CE vs. DGUI.

Efetuada novamente uma análise da solução adotada pelo método “Min-Max” com o método de escolha através da variação de percentagem, verifica-se que a solução adotada apresenta-se como uma boa escolha face às soluções vizinhas. Relativamente à solução anterior (7) para um aumento de investimento de 5,1%, obtêm-se um elevado ganho no índice DGUI de 46,4%, embora exista apenas um ganho marginal para o índice SAIFI (0,4%). Quanto à solução seguinte (9) verifica-se que não apresenta qualquer interesse uma vez que o ganho para o índice SAIFI é marginal (0,9%) mas o agravamento do índice DGUI é muito elevado (84,5%).

Analisando as duas soluções que foram obtidas a partir de cada uma das abordagens e utilizando o método “Min-Max”, é possível verificar que com a primeira abordagem obteve-se uma solução associada ao melhor índice de fiabilidade SAIFI (com uma melhoria de 9,1% face à da segunda abordagem). No entanto, relativamente às outras funções objetivo (índice de fiabilidade DGUI e CE), a melhor solução foi obtida através da segunda abordagem e com ganhos superiores (15,1% e 18,3% respetivamente).

#### 4.7.2 AMBIENTE E ENERGIA NÃO FORNECIDA

Para a situação da redução de gases de efeito de estufa e energia não fornecida, considerando as funções objetivo RGEE, ENF e CE, e tal como já referido, tendo como objetivo fornecer mais informação ao decisor, as várias soluções também poderão ser apresentadas sob a forma de ganhos e reduções percentuais face às soluções vizinhas.



Deste modo, e relativamente aos resultados obtidos pela primeira abordagem com a minimização das funções objetivo RGEE, ENF e CE e considerando os resultados da Figura 4-15, apresenta-se na Figura 4-25 a variação do investimento em equipamentos vs. a variação dos índices RGEE e ENF.

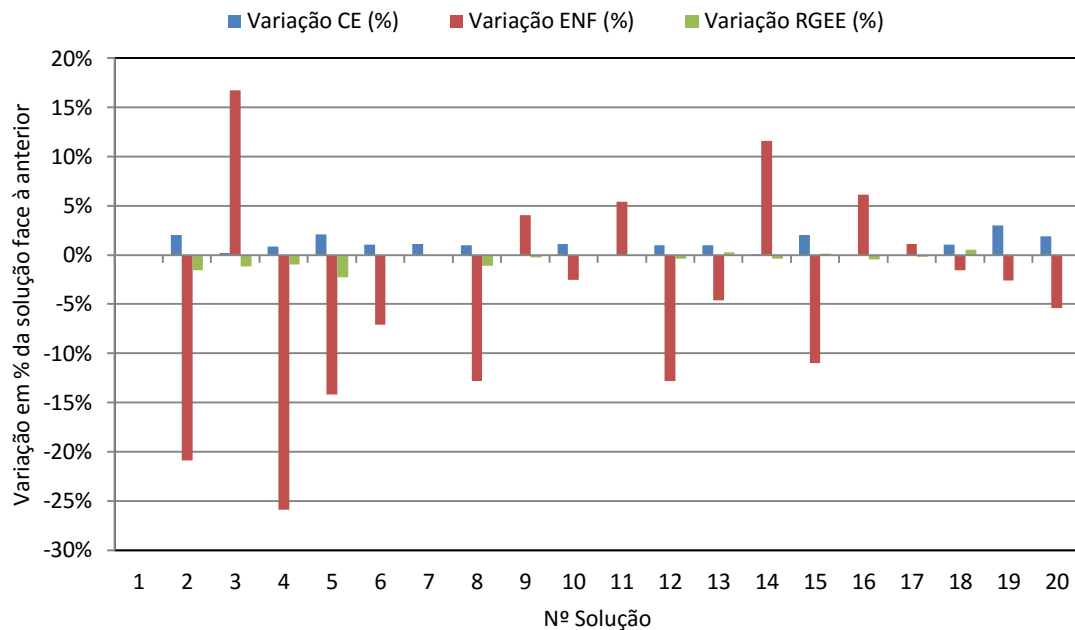


Figura 4-25: Variação do investimento em equipamentos vs. variação na ENF e RGEE, para os resultados obtidos para a segunda abordagem com a aplicação do algoritmo Memético M2.

Analisando este gráfico é possível verificar que sob o ponto de vista da variação do ENF, as soluções 2, 4, 5, 8, 12 e 15 podem-se considerar interessantes face às anteriores dado que se obtêm ganhos superiores a 10% para um incremento de custo máximo de 2,1%. Ainda sob o ponto de vista deste índice (ENF), as soluções 3, 9, 11, 14, 16 e 17 apresentam-se como uma má escolha face às soluções anteriores, dado que associado a um aumento de investimento, também está associado um aumento da energia não fornecida. Relativamente à variação do RGEE, verifica-se que não existem soluções com claros ganhos face às soluções anteriores. No entanto e tendo em consideração a variação do ENF, as soluções 2, 4, 5 e 8, apresentam-se como interessantes face às anteriores.

Tal como anteriormente, também é apresentado a escolha de uma solução a partir do método “Min-Max”. Os resultados obtidos tendo em conta este método são apresentados na Tabela 4-11. Neste caso, a solução a adotar deverá ser a solução número 6.

Tabela 4-11: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2.

Nº Solução [i]	ENF (kWh)	RGEE (kgCO2)	CE (Euros)	SAIFI (i)	SAIDI (i)	CE (i)	Min	Max
1	15.425,79	-5.307,47	415.000	0,00	0,00	1,00	0,000	0,702
2	12.202,07	-5.391,36	423.500	0,35	0,18	0,90	0,182	
3	14.244,73	-5.452,30	424.500	0,13	0,31	0,89	0,130	
4	10.558,81	-5.505,22	428.000	0,53	0,43	0,85	0,429	
5	9.058,97	-5.629,38	437.000	0,70	0,70	0,75	0,698	
6	8.418,07	-5.632,81	441.500	0,77	0,71	0,70	0,702	
7	8.415,57	-5.632,81	446.500	0,77	0,71	0,65	0,646	
8	7.336,46	-5.693,71	451.000	0,89	0,84	0,60	0,596	
9	7.632,75	-5.707,71	451.000	0,85	0,87	0,60	0,596	
10	7.440,60	-5.707,71	456.000	0,88	0,87	0,54	0,539	
11	7.845,48	-5.708,39	456.000	0,83	0,87	0,54	0,539	
12	6.837,89	-5.731,48	460.500	0,94	0,92	0,49	0,489	
13	6.521,96	-5.716,46	465.000	0,98	0,89	0,44	0,438	
14	7.278,03	-5.739,66	465.500	0,89	0,94	0,43	0,433	
15	6.475,73	-5.731,48	475.000	0,98	0,92	0,33	0,326	
16	6.871,78	-5.758,84	475.000	0,94	0,98	0,33	0,326	
17	6.950,60	-5.768,82	475.000	0,93	1,00	0,33	0,326	
18	6.843,69	-5.738,98	480.000	0,94	0,94	0,27	0,270	
19	6.668,02	-5.738,98	494.500	0,96	0,94	0,11	0,107	
20	6.309,72	-5.738,98	504.000	1,00	0,94	0,00	0,000	

A Figura 4-26 apresenta a localização sobre a fronteira de Pareto da solução que deverá ser adotada de acordo com o método “Min-Max”. Através desta figura é possível confirmar que esta solução encontra-se próxima do vértice da fronteira de Pareto.

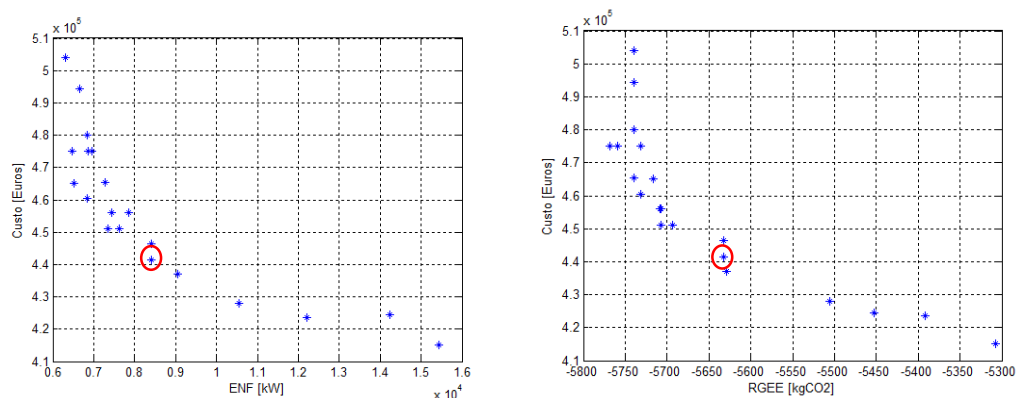


Figura 4-26: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. ENF e CE vs. RGEE.

Analisando este resultado com os resultados da Figura 4-25, verifica-se que a solução 7 face à solução 6 (solução escolhida pelo método “Min-Max”), é de pouco interesse uma vez que para um acréscimo de custos de 1,1% apenas se obtém um ganho de 0,03% para a ENF enquanto que para o RGEE não existe nenhum ganho. Por outro lado, tendo em conta apenas o índice ENF, a solução 6 também se apresenta como interessante face à solução 5 uma vez que para um aumento de custos de 1,0% apresenta ganhos de 7,0% e 0,1% para os índices ENF e RGEE respetivamente.

## 4.8 CONCLUSÕES

Neste capítulo abordou-se o problema da fiabilidade em redes de distribuição incorporando recursos de energia distribuídos. Muitos países não permitem a operação das redes de distribuição em ilha. Também em muitos deles existem contratos com os produtores de geração distribuída que obriga o distribuidor a comprar toda a energia disponível. Neste contexto considerou-se a minimização da indisponibilidade da ligação da geração distribuída à rede, dos índices de fiabilidade de rede SAIDI e SAIFI e o custo associado ao investimento em dispositivos de interrupção de rede. O número, o tipo e a localização de dispositivos de interrupção foram determinados aplicando o algoritmo genético evolutivo Memético. Foram consideradas duas abordagens diferentes. A primeira considerando a minimização de três funções objetivo, DGUI, SAIDI/SAIFI (cada uma considerada à vez), e CE. Na segunda abordagem propôs-se um índice composto, onde a indisponibilidade dos geradores foi integrada nos índices de fiabilidade (SAIDI e SAIFI). Neste índice composto a geração distribuída é representada por um determinado número de clientes ligados à rede.

O problema da fiabilidade das redes de distribuição também foi abordado do ponto de vista da melhoria da redução gases de efeito de estufa e da energia não fornecida. Neste contexto, foram propostos modelos com o objetivo de implementar algoritmos de otimização do tipo multiobjectivo para este tipo de abordagem.

Para verificar as várias abordagens, foram realizados testes sobre uma rede de distribuição portuguesa, real. Os resultados mostram que através da segunda abordagem obtiveram-se melhores soluções tendo em consideração as diversas funções objetivo. A

principal razão deverá estar associada ao facto de que na primeira abordagem são minimizadas três funções, pelo que possivelmente deverá tender para ótimos locais.

Por outro lado, os resultados mostram também que a colocação de dispositivos de interrupção representam também uma importante medida para a redução dos gases de efeito de estufa, ligados à geração de energia eléctrica assim como na redução da energia não fornecida gerada pela geração distribuída, devido à indisponibilidade da rede de distribuição.

As fronteiras de Pareto obtidas em todas as simulações, mostram também que podem ser uma ferramenta valiosa para o planeamento de redes de distribuição, quando um compromisso entre objetivos conflituosos tem que ser seleccionado, baseado num determinado valor pré-estabelecido para uma determinada função objetivo.

## **Planeamento Multiobjectivo em Redes Distribuição Radiais integrando Sistemas de Armazenamento de Energia**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

A qualidade da energia é uma preocupação para as empresas de eletricidade e para os seus clientes. Esta preocupação pode ser atenuada se a fiabilidade da rede elétrica for melhorada. A maior parte das interrupções que os clientes experimentam estão relacionadas com defeitos na rede de distribuição. Nos sistemas de distribuição, especialmente em redes aéreas rurais, a maior parte dos defeitos ocorre durante condições meteorológicas adversas, como tempestades. Estas resultam em interrupções momentâneas ou permanentes. Nas empresas elétricas, as interrupções momentâneas estão a tornar-se uma matéria de grande preocupação, principalmente devido aos seus impactos sobre os novos tipos de carga sensíveis a defeitos. O aumento da sensibilidade de algumas cargas a interrupções momentâneas tem forçado as empresas elétricas a considerar as interrupções momentâneas de um modo mais cuidadoso. Este tipo de interrupções pode causar uma perda de produção numa variedade de indústrias que requerem uma alimentação ininterrupta assim como nas cargas residenciais como computadores e equipamentos eletrónicos sensíveis a interrupções momentâneas. Por outro lado têm também impacto no grau de satisfação dos clientes. A fiabilidade nos sistemas de distribuição é usualmente medida utilizando índices de fiabilidade. Os índices mais utilizados pelas empresas elétricas são descritos na norma do IEEE 1366. Esta norma, para

interrupções momentâneas recomenda a utilização do índice MAIFI (*Momentary Average Interruption Frequency Index*) e MAIFI<sub>E</sub> (*Momentary Average Interruption Event Frequency Index*) e para interrupções permanentes como já referido anteriormente SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) e SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*).

Dado que as interrupções momentâneas são uma preocupação recente das empresas elétricas comparativamente com as interrupções permanentes, existem poucos trabalhos onde seja feita a minimização do índice MAIFI. Alguns utilizam a colocação de interruptores e dispositivos de proteção para minimizar as interrupções momentâneas. Isto é considerado em [66] usando um algoritmo do tipo *Ant Colony*, em [64] usando um algoritmo genético e em [65] utilizando uma lógica *fuzzy*. A atenuação da redução do nível de tensão é utilizado em [67] usando um algoritmo gravitacional e em [102] os índices de fiabilidade são minimizados utilizando sistemas dinâmicos de restauro de tensão. Em [103] um algoritmo genético é utilizado para aumentar a fiabilidade considerando a colocação ótima de compensadores. Por outro lado os sistemas de armazenamento de energia têm vindo a ser cada vez mais utilizados para melhorarem a fiabilidade de redes de distribuição. Em [68] é apresentada uma aplicação de sistemas de armazenamento de energia para a gestão de energia e serviços auxiliares. Em [104] um modelo linear misto é aplicado para o planeamento da expansão da rede considerando as perdas nas linhas. Em [105] os sistemas de armazenamento são otimizados usando uma procura tipo *Tabu Search*. Em [106] os sistemas de armazenamento são utilizados para reduzir as cavas de tensão na rede.

Este trabalho apresenta uma nova abordagem para reduzir as interrupções momentâneas utilizando sistemas de armazenamento de energia. Ao escolher a localização, o número e a energia necessária dos sistemas de armazenamento de energia, é possível minimizar o número de interrupções momentâneas na rede de distribuição.

Neste capítulo são apresentados os índices aplicados na resolução do problema de melhoria da fiabilidade de redes de distribuição radiais considerando interrupções momentâneas e permanentes, minimizando ao mesmo tempo o investimento nos equipamentos.

## 5.2 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA O AUMENTO DA FIABILIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS

As interrupções momentâneas nas redes de distribuição afetam os clientes como atrás foi descrito. Quando um defeito ocorre na rede, os equipamentos de proteção tentam eliminar o problema. Se através de sucessivas operações de religação o defeito desaparecer, então é considerado como uma interrupção momentânea. No entanto, enquanto o equipamento de proteção está a operar os clientes a jusante são afetados por esta interrupção momentânea. Isto pode ser observado na Figura 5-1. Enquanto o dispositivo de proteção PD tenta eliminar o defeito, todos os clientes dos pontos de carga LP1, LP2 e LP3 são afetados.

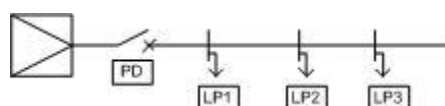


Figura 5-1: Rede de Distribuição sem Sistemas de Armazenamento de Energia.

Com a redução do número de clientes afetados por estes defeitos momentâneos aumenta-se a fiabilidade da rede quanto aos índices MAIFI e MAIFI<sub>E</sub>. A redução do número de clientes afetados por ser conseguida através da utilização de sistemas de armazenamento de energia instalados na rede. Este processo é exemplificado nas figuras seguintes. Se um sistema de armazenamento de energia, associado a um dispositivo de interrupção for instalado no ponto de carga LP2 (Figura 5-2), no caso de um defeito entre LP1 e LP2, enquanto o dispositivo de proteção tenta eliminar o defeito, os clientes entre LP2 e LP3 não são afetados pela interrupção. O sistema de armazenamento de energia alimenta os clientes entre LP2 e LP3, durante o tempo em que o dispositivo de proteção está a tentar eliminar o defeito através das operações de ligação e desligação, tipicamente entre dois a três minutos. No entanto, se existir um defeito a montante do ponto de carga LP2 não existirá qualquer benefício pelo fato de se utilizar este tipo de sistemas de armazenamento.

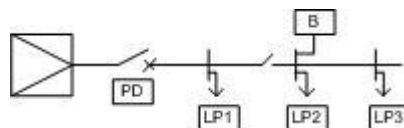


Figura 5-2: Rede de distribuição com um Sistema de Armazenamento de Energia.

No entanto, caso se utilizem vários sistemas de armazenamento, a limitação descrita anteriormente poderá ser atenuada. Na Figura 5-3 apresenta-se um exemplo onde se utilizam dois sistemas de armazenamento. Neste caso, cada um dos sistemas de armazenamento deverá ser dimensionado para alimentar os clientes até ao próximo ponto de carga com outro sistema de armazenamento de energia.

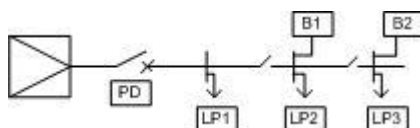


Figura 5-3: Rede de distribuição com dois Sistemas de Armazenamento de Energia.

Neste exemplo é possível verificar que caso exista um defeito entre os pontos LP2 e LP3, apenas os consumidores ligados a LP2 serão afetados. Com a instalação de sistemas de armazenamento de energia na rede de distribuição o número de clientes que sente um defeito momentâneo é reduzido, aumentando deste modo a fiabilidade da rede de distribuição relativamente a este tipo de defeitos. Com a determinação do número, da capacidade e da localização dos sistemas de armazenamento de energia na rede pode-se minimizar o índice de fiabilidade MAIFI. Tendo em conta que associado a cada sistema de armazenamento de energia está associado um dispositivo de interrupção (para isolar a parte da rede sob defeito da parte da rede a alimentar pelo sistema de armazenamento de energia) é possível também minimizar as interrupções permanentes considerando o índice de fiabilidade SAIDI, anteriormente referido. Quando um defeito permanente ocorre, o dispositivo de interrupção é utilizado para isolar a parte da rede sob defeito reduzindo assim o número de clientes afetados pela interrupção. Neste problema o objetivo consiste em determinar a localização, a capacidade e o número dos sistemas de armazenamento de energia associados a dispositivos de interrupção para aumentar a fiabilidade da rede, minimizando ao mesmo tempo o investimento em equipamentos.



Como já foi referido, os sistemas de geração de energia renovável têm vindo a aumentar nas redes elétricas. Este aumento deve-se por um lado à redução dos custos associados à geração eólica e solar e por outro ao aumento das preocupações ambientais as ligadas às emissões associadas à geração de eletricidade utilizando combustíveis fósseis. À medida que as empresas elétricas começam a considerar maior flexibilidade nos seus processos de planeamento e operação de redes, os sistemas de armazenamento de energia têm vindo a ganhar importância [69], [107], [108]. O armazenamento de energia é uma tecnologia há muito estabelecida, correspondendo o armazenamento hídrico e a bombagem a 99% da capacidade mundial de armazenamento [69], [70], [107]. O armazenamento hídrico e a bombagem foram essenciais quando as redes Europeias eram maioritariamente compostas por um grande número de redes regionais, com fracas interligações. Hoje em dia, as modernas centrais de geração elétrica (ciclo de gás combinado) estão cada vez mais flexíveis [107]. O seu tempo de resposta a alterações rápidas por parte da procura está a aumentar, podendo ser uma importante fonte de potência de reserva. Para o curto prazo, os sistemas de armazenamento de energia terão que preencher o intervalo de tempo entre a resposta das centrais elétricas e os sistemas de geração de energia renovável (como eólicas e solares). O desafio está no aumento da capacidade dos sistemas existentes assim como no aumento da sua eficiência [69], [70], [107]. Os sistemas de armazenamento de energia podem ser integrados em diversos locais da rede elétrica onde a geração está ligada. Dependendo desta localização a capacidade dos sistemas de armazenamento podem ser de grande porte (GW), de médio porte (MW) e pequeno porte (kW) [107]. A seguir apresentam-se as principais tecnologias com aplicação em sistemas de armazenamento nas redes elétricas, sendo que algumas ainda não estão na fase de aplicação comercial:

Sistemas de armazenamento na rede elétrica de médio porte (MW):

- Potência: supercondensados, supercondutores, “*flywheels*”;
- Energia: baterias tais como chumbo-ácido, íons de lítio, sódio e enxofre;
- Energia e potência: baterias de chumbo ácido e íons de lítio.

Os principais desafios de desenvolvimento que se colocam aos sistemas de armazenamento são 1) em termos tecnológicos (aumento da capacidade e eficiência), 2) em termos de regulação (incentivos à criação de capacidade de armazenamento, aumento do mercado Europeu de energia), 3) estratégicos (desenvolvimento de uma abordagem

holística ao aspetos políticos, regulatórios, tecnológicos e de mercado), mas acima de tudo 4) são os aspetos económicos (custo dos sistemas de armazenamento) que têm que ser reduzidos. Embora as baterias já existam à muito tempo, o seu custo proibitivo tem limitado a sua utilização em sistemas de armazenamento de energia. No entanto, nos últimos anos têm-se verificado uma redução de custos e novos tipos de baterias mostram-se muito promissoras. De acordo com diversos trabalhos, a utilização de baterias em sistemas de armazenamento de energia de médio porte nas redes elétricas tem vindo a aumentar [69], [70], [107], [108], mostrando-se atualmente a tecnologia mais adequada à utilização em redes elétricas de distribuição. Tendo isto em consideração, neste trabalho considerou-se a aplicação de baterias em sistemas de armazenamento ligados à rede de distribuição.

### 5.3 DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES OBJETIVO PARA A OTIMIZAÇÃO MULTIOBJECTIVO

A utilização de sistema de armazenamento de energia terá como objetivo a redução do número de clientes afetados por interrupções momentâneas. Tal como já foi referido, para este tipo de defeitos, os índices mais utilizados pelas empresas de eletricidade são o MAIFI ou MAIFI<sub>E</sub>. A diferença entre os dois é que o primeiro contabiliza todas as operações de ligação e desligação enquanto que o segundo apenas conta como uma interrupção o conjunto de operações que foram realizadas para eliminar o defeito. A norma do IEEE 1366 [13] apresenta as seguintes definições:

- Interrupção Momentânea: Operação de um dispositivo de interrupção que resulta numa tensão zero;
- Evento de Interrupção Momentânea: Uma interrupção de duração limitada ao tempo necessário para restaurar o serviço através de um dispositivo de interrupção. Tais operações devem estar finalizadas no tempo máximo de 5 minutos;
- Interrupção Permanente: Qualquer interrupção não classificada como interrupção momentânea e de duração superior a 5 minutos.

Nesta abordagem o sistema de armazenamento de energia terá obrigatoriamente de estar associado a dispositivos de interrupção. Por outro lado, embora as empresas elétricas

tenham como objetivo minimizar as interrupções momentâneas, continuam a ter como um dos requisitos principais a minimização das interrupções permanentes. Neste contexto, serão definidas diversas funções de minimização, em que serão considerados os índices MAIFI, SAIDI e CE (custo associado ao investimento em dispositivos de interrupção).

*Função Objetivo MAIFI:* Relativamente às interrupções momentâneas, o índice MAIFI é o mais utilizado pelas empresas elétrica. Neste sentido a primeira função objetivo considerada é o índice MAIFI. Este índice representa o número total de interrupções multiplicado pelo número de clientes afetados pela interrupção, dividido pelo número total de clientes da rede. De modo a integrar este índice no problema de otimização, propôs-se a seguinte função a minimizar no qual se integram as variáveis de decisão.

$$\min \frac{\sum_i ((\gamma_i \times ID_{Si} \times N_i) + (\beta_i \times t_{Ni} \times N_i))}{N_t} \quad (5-1)$$

Onde  $ID_{Si}$  é o número de operações do dispositivo de proteção,  $N_i$  é o número de clientes afetados por uma interrupção na seção  $i$ , e  $N_t$  é o número total de clientes da rede de distribuição e  $\gamma_i$  a variável de decisão definida em (3-2).

*Função Objetivo SAIDI:* Tal como já foi referido, para interrupções permanentes o índice mais considerada pelas empresas elétricas é o índice SAIDI. Esta é a segunda função objetivo considerada para este problema de minimização. Este índice representa o tempo médio de interrupção que cada cliente experimenta durante um tempo específico (normalmente de um ano) sendo descrita pela seguinte expressão:

$$\min \frac{\sum_i ((\lambda_i \times t_{Si} \times N_i) + (\beta_i \times t_{Ni} \times N_i))}{N_t} \quad (5-2)$$

Esta equação tem em conta a Equação (3-4), adaptada para considerar apenas um tipo de dispositivo de interrupção.

*Função objetivo CE:* O custo do equipamento é e terceira função objetivo considerada neste problema. Representa o custo relacionado com o investimento em sistemas de armazenamento de energia e dispositivos de interrupção. Esta função é formulada de acordo com a seguinte expressão:

$$CE = \sum_i ((\lambda_i \times C_{Si}) + (\alpha_i \times CSA_i)) \quad (5-3)$$

onde  $C_{Si}$  é o custo de um interruptor na secção  $i$  e  $CSA_i$  é o custo do sistema de armazenamento de energia na secção  $i$ .

De salientar que o custo dos sistemas de armazenamento de energia foi calculado considerando um custo fixo para um kW a fornecer durante 5 minutos, multiplicado pela potência necessária para alimentar os clientes a jusante (até ao próximo sistema de armazenamento de energia) durante 5 minutos e um custo fixo para o inversor adequado à potência da bateria.

*Restrições:* Tendo em consideração os elevados custos dos sistemas de armazenamento, considerou-se como restrição um número limite de sistemas de armazenamento de energia e dispositivos de interrupção a colocar na rede. Devido à dimensão destes sistemas também se considerou que em alguns nós da rede não será possível colocar sistemas de armazenamento de energia.

#### 5.4 ALGORITMO EVOLUTIVO PARA A OTIMIZAÇÃO MULTIOBJECTIVO

Tendo em atenção os resultados obtidos no capítulo 3, para a otimização das funções objetivo especificadas acima, foi desenvolvido um algoritmo memético do tipo M2, de acordo com o descrito no ponto 3.6 para a otimização multiobjectivo deste problema. Tal como referido, esta variante possui uma estrutura de um algoritmo memético não padronizada, dado que a procura local é aplicada antes das operações genéticas (Figura 3-9). Para além da codificação do problema já descrito no ponto 3.5, para a otimização da

colocação de dispositivos de interrupção em redes de distribuição integrando geração distribuída, o desenvolvimento do algoritmo do tipo memético M2 aplicado nesta otimização, teve em conta a codificação da posição dos sistemas de armazenamento na rede e a sua potência. Esta codificação considera o número do nó onde está ligado o sistema de armazenamento assim como a sua potência. O desenvolvimento do algoritmo possibilita a colocação dos sistemas de armazenamento em qualquer nó da rede de distribuição, com exceção das restrições anteriormente referidas. Tendo em consideração este tipo de problema, a variável de decisão é a sua localização na rede de distribuição dos dispositivos de interrupção de acordo com as funções descritas em (3-1) e (3-3). Para além destas variáveis de decisão, neste problema foi considerado outra variável que têm em conta a existência de um sistema de armazenamento de energia, num nó. Esta nova variável de decisão é formulada de acordo com a seguinte expressão:

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, & \text{se um sistema de armazenamento for colocado na secção } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5-4)$$

A população inicial é inicializada aleatoriamente, tendo-se utilizado tal como anteriormente uma população inicial de 100 indivíduos. A geração dos indivíduos tem em conta as restrições consideradas neste problema, anteriormente referidas: 1) número limite de sistemas de armazenamento de energia a colocar na rede e 2) interdição de alguns nós para colocação de sistemas de armazenamento. Dado que neste problema existe restrição do número de equipamentos que se podem utilizar, optou-se por utilizar uma estrutura diferente para os cromossomas, quando comparado com a abordagem efetuada nos capítulos anteriores. Neste sentido, para este problema foram considerados dois cromossomas com a dimensão do número máximo de equipamentos a instalar na rede. O primeiro cromossoma guarda o número da seção onde está instalado um equipamento (dispositivo de interrupção ou sistema de armazenamento de energia). O segundo guarda o tipo de equipamento instalado, “1” para a existência de um dispositivo de interrupção no nó, “2” para a existência de um sistema de armazenamento de energia no nó e “0” sem qualquer tipo de equipamento no nó. A geração dos “filhos” tem em conta as operações genéticas de recombinação e mutação. Tal como anteriormente, para a recombinação foi

utilizado o ponto médio para a divisão dos “pais” e para a mutação manteve-se a taxa de mutação de 1%.

## 5.5 ESTUDO DE CASO

Como caso de estudo para este tipo de abordagem, foi novamente utilizada a rede de 94 nós descrita no capítulo 3. Dado que este é um problema com objetivos conflitantes entre si, foi também utilizado uma técnica de otimização multiobjectivo utilizando o algoritmo evolutivo memético descrito no ponto anterior para otimizar as funções objetivo atrás descritas. Como referido, foram consideradas algumas restrições de natureza técnica e económica nesta otimização multiobjectivo para a colocação de sistemas de armazenamento de energia na rede de distribuição. As restrições técnicas estão relacionadas com impedimentos na colocação de sistemas de armazenamento de energia em algumas seções da rede. As restrições económicas estão também relacionadas com a limitação do investimento no número de sistemas de armazenamento de energia e interruptores instalados na rede de distribuição. O algoritmo de otimização foi aplicado à rede de distribuição apresentada na Figura 3-10. De acordo com as restrições referidas anteriormente, o número de equipamentos a instalar foi limitado a 15, existindo seis nós onde não é possível colocar equipamentos, nomeadamente os nós 20, 41, 49, 63, 80 e 86. Os resultados obtidos de acordo com a abordagem e algoritmo de otimização propostos são apresentados na Figura 5-4. Estas soluções são o melhor conjunto de soluções que se obtém a partir da minimização simultânea das três funções objetivo MAIFI, SAIDI e CE.

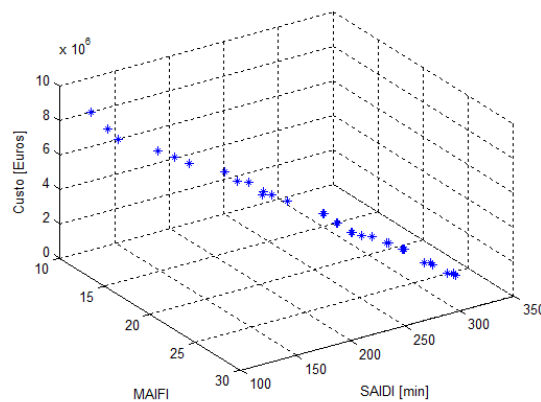


Figura 5-4: Soluções não dominadas obtidas com a aplicação do algoritmo genético memético, às funções objetivo MAIFI, SAIDI e CE.

Para uma melhor observação dos resultados, na Figura 5-5 e na Figura 5-6, apresentam-se os resultados obtidos anteriormente mas num espaço bidimensional. Estas figuras mostram que tendo apenas em consideração duas funções objetivo (MAIFI vs. CE ou SAIDI vs. CE) existem algumas soluções dominadas. No entanto, as soluções que são dominadas tendo em consideração as funções objetivo MAIFI vs. CE, são soluções não dominadas tendo em consideração as funções objetivo SAIDI vs. CE e vice-versa.

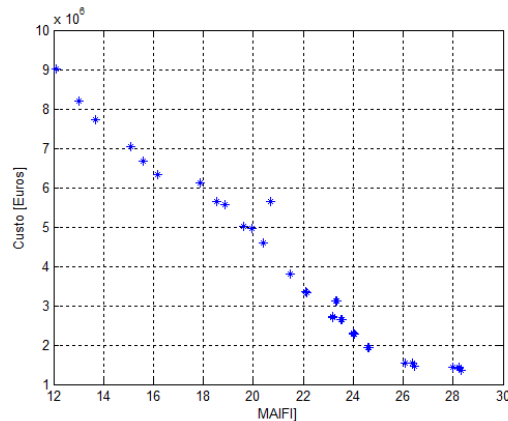


Figura 5-5: Decomposição dos resultados apresentados em 3D, de acordo com as funções objetivo MAIFI vs. CE.

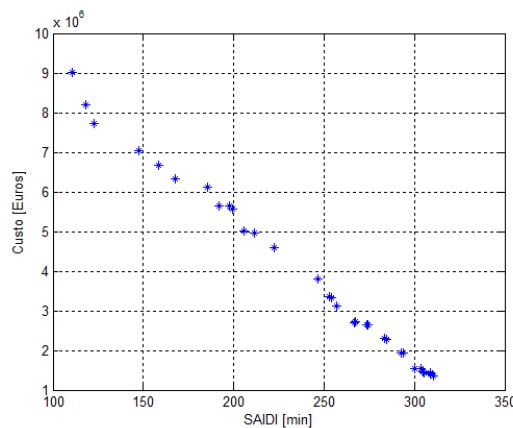


Figura 5-6: Decomposição dos resultados apresentados em 3D, de acordo com as funções objetivo SAIDI vs. CE

Cada solução da fronteira de Pareto representa uma solução específica que é ótima no seu modo. Dos resultados apresentados é possível verificar que quando o custo dos equipamentos aumenta, o índice de fiabilidade MAIFI diminui. O mesmo também é verdade para o índice SAIDI. As melhores soluções tendo em consideração cada função

objetivo, assim como o número, a localização das baterias e os interruptores associadas a estas soluções, são apresentados Tabela 5-1. Como esperado para soluções com menor investimento em equipamentos maior será o valor dos índices de fiabilidade e vice-versa. De facto, para a solução com menor investimento, obtêm-se ganhos para os índices MAIFI e SAIDI de 33,3% e 14,1% respetivamente, enquanto que para a solução associada ao maior custo obtêm-se ganhos para estes índices de 71,4% e 69,5%. De referir, que a diferença no custo dos equipamentos também está relacionada com a capacidade de carga das baterias. Por outro lado, os interruptores têm todos o mesmo custo.

Tabela 5-1: Melhores soluções considerando cada função objetivo (MAIFI, SAIDI, CE), e localização dos sistemas de armazenamento e dispositivos de interrupção.

MAIFI	SAIDI [min]	CE (€)	Localização dos sistemas de armazenamento e dispositivos de interrupção
42,0475	361,12	0	Situação inicial sem equipamentos
28,3350	310,2887	1.343.000	<p>Nós com equipamentos: 8 10 14 21 25 28 31 36 42 45 47 48 52 54 93</p> <p>Tipo de equipamento por nó: 1 0 2 0 0 2 0 1 1 2 2 0 0 2 1</p>
12,1231	110,8370	9.007.400	<p>Nós com equipamentos: 7 8 10 24 36 43 44 48 50 57 61 84 87 92 93</p> <p>Tipo de equipamento por nó: 2 2 2 1 1 0 1 2 2 1 2 2 2 0 2</p>

**Nota:** “0” sem qualquer tipo de equipamento, “1” dispositivo de interrupção e “2” sistema de armazenam. de energia.

O algoritmo de otimização foi novamente aplicado à rede de distribuição apresentada na Figura 3-10, mas agora tendo em consideração as funções objetivo MAIFI, SAIFI e CE. Os resultados obtidos a partir desta otimização são apresentados na Figura 5-7. Estes resultados são o melhor conjunto de soluções que se obtém a partir da minimização simultânea das três funções objetivo MAIFI, SAIFI e CE.



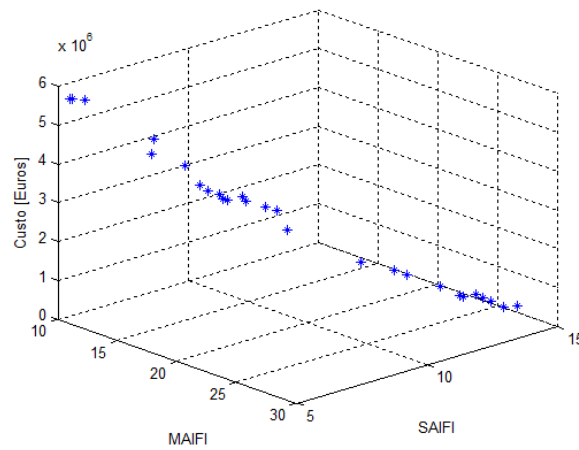


Figura 5-7: Soluções não dominadas obtidas com a aplicação do algoritmo genético memético, às funções objetivo MAIFI, SAIFI e CE.

Para uma melhor observação dos resultados, estes são apresentados num espaço 2D tal como se pode verificar pela Figura 5-8 e Figura 5-9. À imagem do que se verificou no caso anterior, também neste caso é possível verificar que existem algumas soluções dominadas quando se analisa apenas sob o ponto de vista de duas funções objetivo. No entanto, as soluções dominadas tendo em consideração as funções objetivo MAIFI vs. CE são não dominadas quando se considera as funções objetivo SAIFI vs. CE e vice-versa.

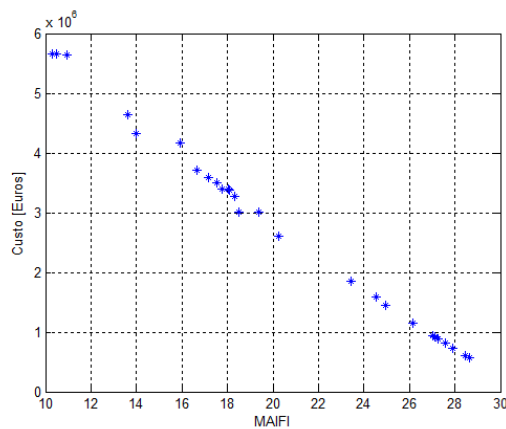


Figura 5-8: Decomposição dos resultados apresentados em 3D, de acordo com as funções objetivo MAIFI vs. CE.

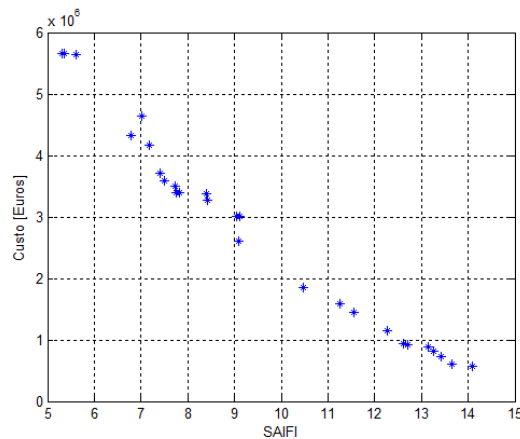


Figura 5-9: Decomposição dos resultados apresentados em 3D, de acordo com as funções objetivo SAIFI vs. CE

Para uma análise dos resultados obtidos sob o ponto de vista das soluções extremas (mais económica e a de maior fiabilidade), são apresentados Tabela 5-2 os correspondentes valores de cada função objetivo. Nesta tabela também se apresenta o número e localização das baterias e dispositivos de interrupção. Dos resultados apresentados, verifica-se que para a solução associada a um menor custo de investimento existe um ganho para os índices de fiabilidade MAIFI e SAIFI de 33,3% e 54,8% respetivamente. Quanto à solução associada ao maior custo obtêm-se ganhos para os índices de fiabilidade 76,1% e 83,8% (MAIFI e SAIFI respetivamente). Como esperado, associado à solução de menor custo, é necessário um menor número de sistemas de armazenamento de energia e dispositivos de interrupção.

Tabela 5-2: Melhores soluções considerando cada função objetivo (MAIFI, SAIFI, CE), e localização dos sistemas de armazenamento e dispositivos de interrupção.

MAIFI	SAIFI	CE (€)	Localização dos sistemas de armazenamento e dispositivos de interrupção
42,0475	31,33	0	Situação inicial sem equipamentos
28,6303	14,0993	562.200	Nós com equipamentos: 11 15 17 29 30 32 35 50 58 67 71 81 85 89 93 Tipo de equipamento por nó: 0 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 2 1 1 2
10,2789	5,3149	5.654.600	Nós com equipamentos: 7 10 17 26 31 42 50 57 60 64 73 77 82 88 93 Tipo de equipamento por nó: 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2

**Nota:** “0” sem qualquer tipo de equipamento, “1” dispositivo de interrupção e “2” sistema de armazenamento de energia.

## 5.6 ESCOLHA DE UMA SOLUÇÃO

Relativamente à análise das soluções e quanto à sua possível escolha esta será efetuada de acordo com as abordagens apresentadas no capítulo anterior. Tal como referido nos capítulos anteriores, tendo como objetivo fornecer mais informação ao decisor, as várias soluções também poderão ser apresentadas sob a forma de ganhos e reduções percentuais face às soluções vizinhas. Deste modo, e relativamente aos resultados obtidos pela primeira abordagem com a minimização das funções objetivo SAIDI, MAIFI e CE e considerando os resultados da Figura 5-4, apresenta-se na Figura 5-10 a variação do investimento em equipamentos vs. a variação dos índices SAIDI e MAIFI. Através desta figura, é possível verificar que as soluções 9, 12, 15, 19, 23, 25 e 28 se apresentam como soluções pouco interessantes uma vez que para ganhos de fiabilidade relativamente pequenos face às soluções anteriores, requerem custo de investimento superiores a 10,1%. A solução 29 também se apresenta como desaconselhável, uma vez que para um aumento de investimento de 1,6%, apenas se obtém um ganho de 1,0% para o índice de fiabilidade SAIDI. Ainda relativamente a esta solução, sob o ponto de vista do índice de fiabilidade MAIFI, esta apresenta um agravamento face à solução anterior de 9,7%.

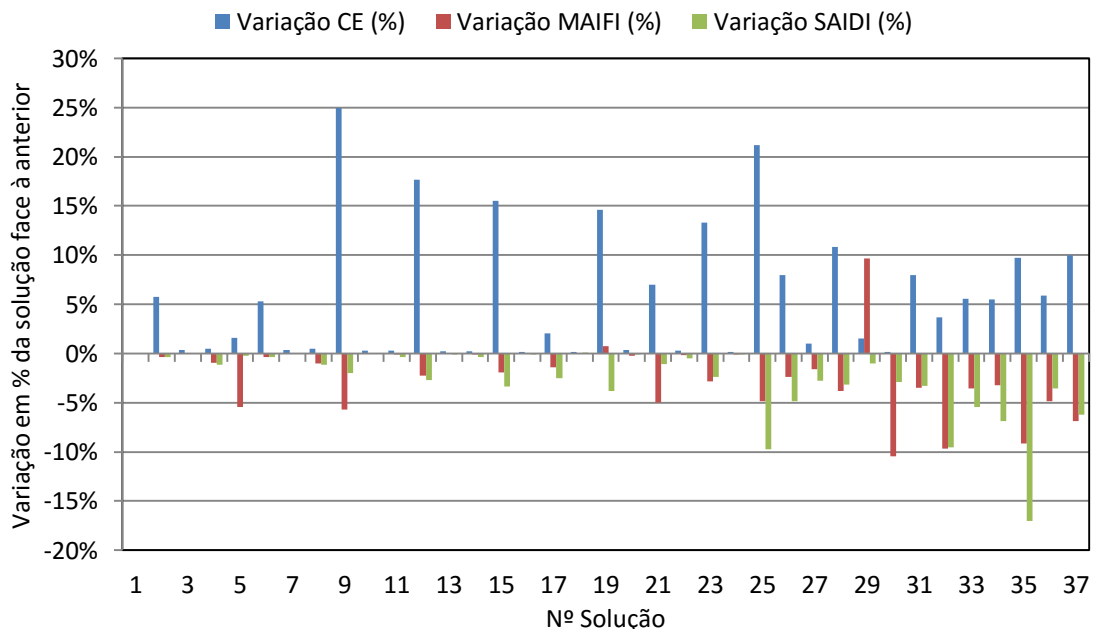


Figura 5-10: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIDI e MAIFI, para os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo Memético M2.

A solução 30 é a que se apresenta como mais interessante face à anterior, uma vez que para um aumento de investimento de 0,1% obtêm-se ganhos dos índices de fiabilidade MAIFI e SAIDI, de 10,4% e 2,9% respetivamente.

Para a mesma abordagem mas agora considerando os resultados da Figura 5-7 respeitantes à minimização das funções objetivo SAIFI, MAIFI e CE, apresenta-se na Figura 5-11 a variação do investimento em equipamentos vs. variação dos índices SAIFI e MAIFI. À imagem do que se verificou no caso anterior, existem várias soluções que se apresentam como pouco interessantes face às anteriores. De facto para as soluções 2, 3, 4, 5, 8, 9, 11, 12, 13 e 22, verifica-se que percentualmente são necessários custos de investimento claramente superiores aos ganhos que se obtêm para os índices de fiabilidade. De referir ainda, que as soluções 14, 17, 23 e 26, poderão eventualmente apresentar-se como interessantes face às anteriores, tendo em consideração os ganhos percentuais que se obtêm para os índices de fiabilidade como função do custo de investimento.

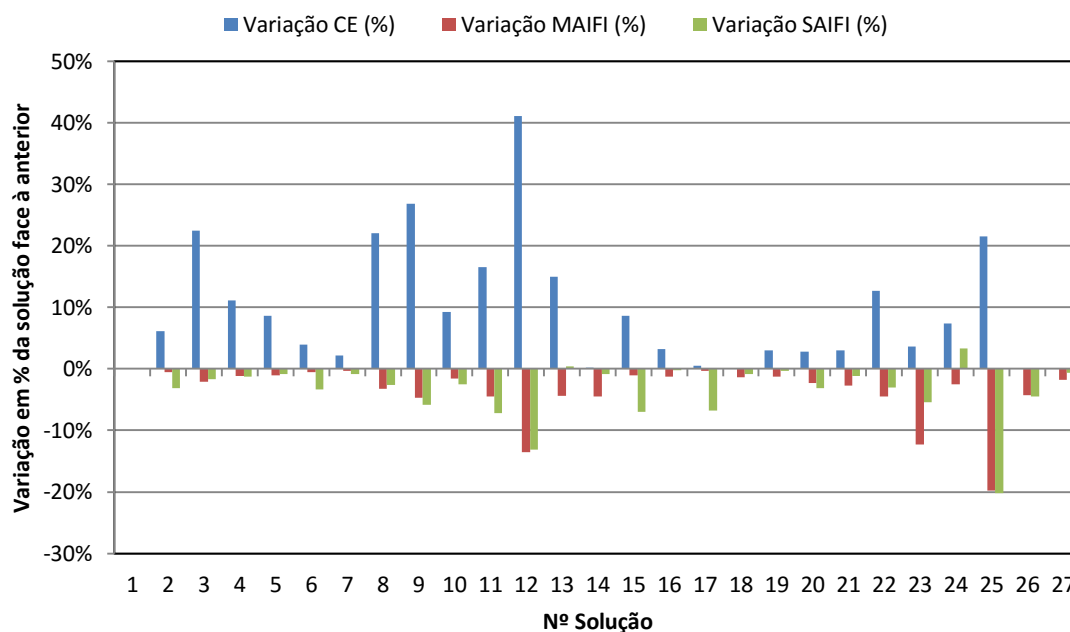


Figura 5-11: Variação do investimento em equipamentos vs. variação no SAIFI e MAIFI, para os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo Memético M2.

Para as funções objetivo SAIDI, MAIFI e CE, os resultados obtidos de acordo com o método “Min-Max” são apresentados na Tabela 5-3. Tendo em consideração este método e os resultados apresentados nesta tabela, a solução a adotar deverá ser a número 27.

Tabela 5-3: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2.

Nº Solução [i]	MAIFI	SAIDI [min]	CE (Euros)	MAIFI (i)	SAIDI (i)	CE (i)	Min	Max
1	28,3350	310,2887	1343000	0,00	0,00	1,00	0,00	0,52
2	28,2406	309,1014	1420000	0,01	0,01	0,99	0,01	
3	28,2390	309,0955	1425000	0,01	0,01	0,99	0,01	
4	27,9762	305,5486	1432200	0,02	0,02	0,99	0,02	
5	26,4537	304,7949	1455400	0,12	0,03	0,99	0,03	
6	26,3594	303,6075	1532400	0,12	0,03	0,98	0,03	
7	26,3578	303,6017	1537400	0,12	0,03	0,97	0,03	
8	26,0950	300,0548	1544600	0,14	0,05	0,97	0,05	
9	24,6123	294,0669	1930600	0,23	0,08	0,92	0,08	
10	24,6065	293,8676	1935600	0,23	0,08	0,92	0,08	
11	24,5856	292,8362	1940600	0,23	0,09	0,92	0,09	
12	24,0296	284,8272	2283600	0,27	0,13	0,88	0,13	
13	24,0229	284,6201	2288600	0,27	0,13	0,88	0,13	
14	23,9971	283,5464	2293600	0,27	0,13	0,88	0,13	
15	23,5350	274,0100	2649600	0,30	0,18	0,83	0,18	
16	23,5292	273,8108	2654600	0,30	0,18	0,83	0,18	
17	23,1918	266,9556	2708600	0,32	0,22	0,82	0,22	
18	23,1902	267,2066	2712600	0,32	0,22	0,82	0,22	
19	23,3569	256,9740	3109600	0,31	0,27	0,77	0,27	
20	23,2978	256,7079	3119600	0,31	0,27	0,77	0,27	
21	22,1377	253,9907	3337600	0,38	0,28	0,74	0,28	
22	22,1051	252,7099	3347600	0,38	0,29	0,74	0,29	
23	21,4790	246,6143	3792600	0,42	0,32	0,68	0,32	
24	21,4581	246,3994	3797600	0,42	0,32	0,68	0,32	
25	20,4191	222,4586	4603200	0,49	0,44	0,57	0,44	
26	19,9304	211,6916	4969200	0,52	0,49	0,53	0,49	
27	19,6139	205,8677	5018200	0,54	0,52	0,52	0,52	
28	18,8614	199,3567	5563200	0,58	0,56	0,45	0,45	
29	20,6836	197,3865	5649200	0,47	0,57	0,44	0,44	
30	18,5271	191,6221	5657200	0,60	0,59	0,44	0,44	
31	17,8801	185,3116	6107200	0,64	0,63	0,38	0,38	
32	16,1489	167,6604	6330400	0,75	0,72	0,35	0,35	
33	15,5747	158,5290	6683400	0,79	0,76	0,30	0,30	
34	15,0716	147,6035	7049400	0,82	0,82	0,26	0,26	
35	13,6900	122,4851	7734400	0,90	0,94	0,17	0,17	
36	13,0214	118,1618	8187400	0,94	0,96	0,11	0,11	
37	12,1231	110,8370	9007400	1,00	1,00	0,00	0,00	

A Figura 5-12 apresenta sobre a fronteira de Pareto, a solução a adotar de acordo com o método “Min-Max”. Através desta figura verifica-se que esta solução encontra-se aproximadamente no vértice da fronteira de Pareto.

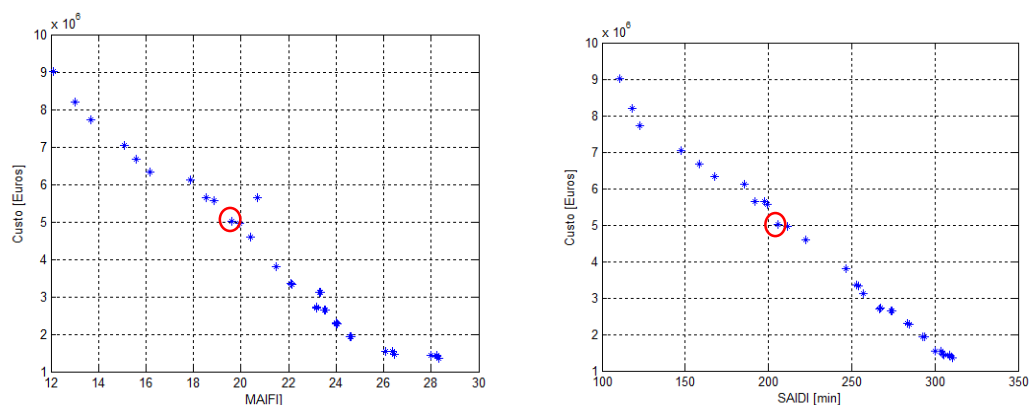


Figura 5-12: Solução adotada na primeira abordagem, pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIDI e CE vs. MAIFI

Analisando a solução obtida face aos resultados apresentados sob o ponto de vista da variação do investimento em equipamentos vs. variação dos índices de (Figura 5-10), verifica-se que esta solução é interessante face à anterior, uma vez que para um aumento de investimento de 1% se obtêm ganhos nos índices MAIFI e SAIDI de 1,6% e 2,8% respetivamente. Já as soluções 26 e 28 apresentam-se como pouco interessantes face às anteriores.

Considerando agora as funções objetivo MAIFI, SAIFI e CE, os resultados obtidos a partir da aplicação do método “Min-Max” são apresentados na Tabela 5-4. Através desta tabela é possível verificar que neste caso, a solução a adotar deverá ser a número 14.

Tabela 5-4: Selecção de uma solução não dominada, através da aplicação do método “Min-Max” para as soluções obtidas com a aplicação do algoritmo memético M2.

Nº Solução [i]	MAIFI	SAIFI	CE (Euros)	MAIFI (i)	SAIFI (i)	CE (i)	Min	Max
1	28,6303	14,0993	562200	0,00	0,00	1,00	0,000	0,52
2	28,4750	13,6571	597000	0,01	0,05	0,99	0,008	
3	27,8855	13,4320	731400	0,04	0,08	0,97	0,041	
4	27,5771	13,2674	812600	0,06	0,09	0,95	0,057	
5	27,2773	13,1548	883000	0,07	0,11	0,94	0,074	
6	27,1220	12,7126	917800	0,08	0,16	0,93	0,082	
7	27,0434	12,6112	937800	0,09	0,17	0,93	0,086	
8	26,1679	12,2783	1145200	0,13	0,21	0,89	0,134	
9	24,9497	11,5603	1452600	0,20	0,29	0,83	0,201	
10	24,5566	11,2653	1586600	0,22	0,32	0,80	0,222	
11	23,4479	10,4609	1848800	0,28	0,41	0,75	0,282	
12	20,2630	9,0850	2608800	0,46	0,57	0,60	0,456	
13	19,3822	9,1232	3001200	0,50	0,57	0,52	0,504	
14	18,5088	9,0509	3006800	0,55	0,57	0,52	0,520	
15	18,3166	8,4168	3267000	0,56	0,65	0,47	0,469	
16	18,0874	8,3949	3371000	0,57	0,65	0,45	0,448	
17	18,0250	7,8273	3388200	0,58	0,71	0,45	0,445	
18	17,7829	7,7607	3393200	0,59	0,72	0,44	0,444	
19	17,5537	7,7387	3496200	0,60	0,72	0,42	0,424	
20	17,1495	7,4943	3594600	0,63	0,75	0,40	0,405	
21	16,6782	7,4057	3703600	0,65	0,76	0,38	0,383	
22	15,9367	7,1796	4175400	0,69	0,79	0,29	0,290	
23	13,9835	6,7935	4329400	0,80	0,83	0,26	0,260	
24	13,6375	7,0181	4647600	0,82	0,81	0,20	0,198	
25	10,9354	5,6013	5647600	0,96	0,97	0,00	0,001	
26	10,4675	5,3499	5650600	0,99	1,00	0,00	0,001	
27	10,2789	5,3149	5654600	1,00	1,00	0,00	0,000	

A Figura 5-13 apresenta a posição da solução a adotar de acordo com este método na fronteira de Pareto. À imagem do que se verificou no caso anterior, também nesta situação verifica-se que esta solução se encontra aproximadamente no vértice da fronteira de Pareto.

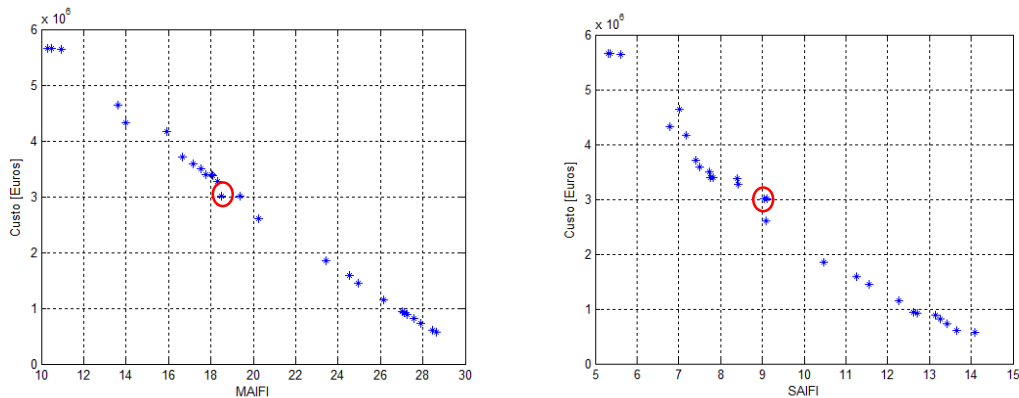


Figura 5-13: Solução adotada pela aplicação do método MIN Max à melhor fronteira de Pareto, obtida com a aplicação do algoritmo Memético M2, para as funções objetivo CE vs. SAIFI e CE vs. MAIFI.

Comparando a solução obtida face aos resultados apresentados sob a forma de ganhos e reduções percentuais face às soluções vizinhas (Figura 5-11). Pode-se considerar, que esta solução apresenta vantagens face à solução anterior (13) uma vez que para um aumento de investimento de 0,2%, obtêm-se ganhos para os índices MAIFI e SAIFI de 4,5% e 0,8% respetivamente. Tal como no caso anterior, as soluções vizinhas (13 e 15) também se podem considerar de pouco interesse dado que percentualmente os aumentos de investimento são superiores aos ganhos dos índices de fiabilidade.

Como referido, com a aplicação do método “Min-Max” pretendeu-se maximizar a escolha de uma solução, a partir de um conjunto de soluções (fronteira de Pareto) que foram obtidas através da minimização de várias funções objetivo de um problema multiobjectivo. Pela localização das soluções adotadas nos gráficos, verificou-se de um modo geral que elas se localizam no “vértice” da fronteira de Pareto, que corresponde mais ou menos ao ponto central dessa fronteira. As soluções adotadas a partir deste método otimizam a minimização das três funções objetivo de igual modo, isto é, não privilegiam a minimização de uma função objetivo em detrimento das outras.

## 5.7 CONCLUSÕES

Neste capítulo abordou-se o problema emergente nos sistemas de distribuição que consiste no efeito das interrupções momentâneas sobre as novas cargas sensíveis às interrupções momentâneas. Neste contexto, foi apresentado uma nova abordagem para a



redução do índice MAIFI utilizando sistemas de armazenamento de energia para a redução dos clientes afetados pelas interrupções momentâneas. Nesta abordagem considerou-se a otimização do número e local de dispositivos de interrupção a colocar numa rede de distribuição radial, juntamente com sistemas de armazenamento de energia. Para além do número e colocação ótima destes sistemas de armazenamento, também foi equacionado a potência que estes equipamentos deverão fornecer durante um determinado período específico. De acordo com esta formulação foram desenvolvidos modelos para implementar algoritmos de otimização multiobjectivo.

Para além das interrupções momentâneas, foram também minimizadas as interrupções permanentes. Para esta minimização foi considerado o índice de fiabilidade SAIDI. Assim as três funções objetivo a minimizar foram os índices de fiabilidade MAIFI, SAIDI e custo dos equipamentos. Para a implementação da otimização multiobjectivo foi desenvolvido um algoritmo memético, designado de M2. A abordagem proposta foi aplicada a uma rede de distribuição de 94 nós. Dos resultados obtidos é possível verificar que a abordagem proposta pode ser utilizada como uma valiosa ferramenta de planeamento de redes de distribuição.

## **Conclusões e Recomendações para Trabalho Futuro**

### **6.1 CONCLUSÕES**

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia que permite apoiar o planeamento da fiabilidade em redes de distribuição de energia radiais. Com o objetivo de dotar os decisores com informação adequada para o referido planeamento de redes de distribuição, foram propostos modelos multiobjectivo que traduzem os compromissos técnico-económicos em causa para este problema. Ao escolher a localização, o número e o tipo de dispositivos de interrupção na rede de distribuição, é possível maximizar a fiabilidade oferecida aos clientes e minimizar os investimentos realizados pelas empresas elétricas na rede de distribuição.

A colocação de dispositivos de interrupção na rede é um problema de otimização discreto com um grande espaço de soluções. Este tipo de problemas são extremamente difíceis de solucionar utilizando uma abordagem analítica, uma vez que não existe uma expressão que relacione o número, a localização e o tipo de equipamento com os índices de fiabilidade e com o custo total dos equipamentos. Atendendo a este fato, neste trabalho adotou-se uma abordagem de otimização multiobjectivo para a resolução deste problema, composto por várias funções objetivo contraditórias entre si.

No âmbito dos índices de fiabilidade de redes de distribuição radiais e custos de equipamentos foram elaborados modelos matemáticos para a sua integração no problema

de otimização multiobjectivo. Nesta modelação foram introduzidas variáveis de decisão tendo em consideração, o número, a localização e o tipo de dispositivo de interrupção. Na abordagem multiobjectivo foram propostos algoritmos de otimização do tipo evolutivo. Assim, propôs-se utilizar um algoritmo do tipo NSGA-II e um algoritmo memético. Este último é baseado no algoritmo genético NSGA-II, com incorporação de uma procura local, para melhorar a eficiência de procura das soluções ótimas. Relativamente a este algoritmo memético, foram propostas duas variantes. Na primeira variante, baseada na abordagem clássica, a procura local é aplicada depois das operações genéticas. Na segunda variante, utilizou-se uma abordagem alternativa, onde a procura local é aplicada à população corrente. Para testar o desempenho dos algoritmos propostos, estes foram aplicados a uma rede de distribuição radial Portuguesa. Através dos resultados obtidos, foi possível verificar que a abordagem proposta pode ser utilizada como uma válida ferramenta de planeamento, permitindo ao decisor a escolha de uma solução com base nos parâmetros escolhidos para a fiabilidade da rede (SAIDI e SAIFI) e para o investimento pretendido em equipamentos. Também foram apresentadas metodologias para a possível escolha de uma solução final. Estas metodologias foram baseadas no método da variação de percentagem entre soluções adjacentes, e no método “Min-Max”.

Nos últimos anos, as mudanças climáticas elevaram a consciência internacional sobre os impactos que a geração de eletricidade e correspondente uso de energia têm sobre o meio ambiente. Neste contexto, o uso local de fontes de energia renováveis são consideradas como algumas das opções mais promissoras para fornecimento de energia mais segura, limpa e eficiente. Num futuro próximo é expectável que se assista à utilização maciça de sistemas de energias renováveis na forma de GD. Contudo, sob o ponto de vista da fiabilidade a GD apresenta um desafio adicional. Na realidade, após um defeito numa das linhas de uma rede de distribuição radial, para além dos consumidores que poderão ser afetados por esta interrupção, também poderá existir uma indisponibilidade da ligação da GD, resultando deste modo num desperdício de recursos. Deste modo ao escolher criteriosamente a localização, o número e o tipo de dispositivos de interrupção a colocar na rede de distribuição, após um defeito, será possível por um lado minimizar o impacto desta interrupção sob os consumidores, e por outro aumentar a disponibilidade da GD.

Neste âmbito, foram elaborados modelos matemáticos para a integração da geração distribuída no problema de otimização multiobjectivo para o aumento da fiabilidade em

redes de distribuição radiais. Estes modelos permitem a abordagem da maximização da geração distribuída sob um ponto de vista diferente do usual, nomeadamente no funcionamento sem ser em ilha. Neste contexto considerou-se a minimização da indisponibilidade da ligação da geração distribuída à rede, dos índices de fiabilidade de rede SAIDI e SAIFI e o custo associado ao investimento em dispositivos de interrupção de rede. O número, o tipo e a localização de dispositivos de interrupção foram determinados através da implementação de um algoritmo genético do tipo evolutivo. De realçar, que foi implementado a variante não convencional do algoritmo memético que foi proposto para a otimização da fiabilidade nas redes de distribuição radiais sem a GD, tendo em consideração que foi o algoritmo que apresentou melhores resultados. Ao nível da formulação para este problema (com a integração da GD), foram consideradas duas abordagens diferentes. Na primeira abordagem considerou-se a minimização de três funções objetivo, DGUI, SAIDI/SAIFI (tendo apenas em consideração ou uma ou outra), e CE. Para a segunda abordagem propôs-se um índice composto, onde a indisponibilidade dos geradores foi integrada nos índices de fiabilidade (SAIDI e SAIFI). Através dos resultados obtidos, foi possível verificar que através da segunda abordagem obteve-se melhores soluções tendo em consideração as diversas funções objetivo. A razão pelo qual isto se verifica, deverá estar associado ao facto da primeira abordagem ter de minimizar um número superior de funções objetivo, pelo que possivelmente tenderá para ótimos locais.

O problema da fiabilidade das redes de distribuição com integração da GD, também foi abordado do ponto de vista da melhoria da redução gases de efeito de estufa e da energia não distribuída. Neste contexto, foram propostos modelos que permitam quantificar e otimizar estes dois fatores sob o ponto de vista multiobjectivo. Para a otimização multiobjectivo considerou-se três funções a minimizar, nomeadamente RGEE, ENF e CE, tendo sido utilizado a segunda variante do algoritmo memético. O carater contraditório das várias funções objetivo, assim como, as otimizações que se poderão obter com esta abordagens, foram verificadas através de um caso de estudo no qual se utilizou a rede anteriormente descrita.

No contexto das várias otimizações tendo em consideração a integração da GD, também foram apresentados métodos de apoio à tomada de decisão. Os métodos adotados foram os mesmos que foram propostos na primeira abordagem, ou seja, na otimização

multiobjectivo sem a GD. Também foi possível, verificar que estes métodos podem ser utilizados de uma forma complementar. Nesta perspectiva, verificou-se que se poderia utilizar o método “Min-Max” para a escolha de uma primeira solução a partir do conjunto das soluções da fronteira de Pareto, verificando-se posteriormente se através da utilização do método da variação de percentagem entre soluções adjacentes, é possível obter uma solução próxima da primeira opção com ganhos apreciáveis de uma determinada função objetivo.

Nos sistemas de distribuição, especialmente em redes aéreas rurais, a maior parte dos defeitos ocorre durante condições meteorológicas adversas, como tempestades. Estas resultam em interrupções momentâneas ou permanentes. Nas empresas elétricas, as interrupções momentâneas estão a tornar-se uma matéria de grande preocupação, principalmente devido aos seus impactos sobre os novos tipos de carga sensíveis a defeitos. O aumento da sensibilidade de algumas cargas a interrupções momentâneas tem forçado as empresas elétricas a considerar as interrupções momentâneas de um modo mais cuidadoso. Este tipo de interrupções pode causar uma perda de produção numa variedade de indústrias que requerem uma alimentação ininterrupta assim como nas cargas residenciais como computadores e equipamentos eletrónicos sensíveis a interrupções momentâneas. Por outro lado, este fator também tem impacto no grau de satisfação dos clientes. Deste modo, as empresas de distribuição de energia elétrica começam a dar importância aos índices de fiabilidade associados às interrupções de curta duração, como é o caso do índice MAIFI.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma nova abordagem para reduzir as interrupções momentâneas, nomeadamente através da utilização de sistemas de armazenamento de energia. Tendo em consideração esta abordagem, propôs-se a introdução, sua localização e número de dispositivos de interrupção, assim como, o número, localização e energia necessária dos sistemas de armazenamento de energia, para a minimização do número de interrupções momentâneas na rede de distribuição. Para a implementação desta abordagem, desenvolveram-se modelos matemáticos para a integração dos sistemas de armazenamento num problema de otimização multiobjectivo para a fiabilidade da rede de distribuição radial tendo em consideração as interrupções de curta duração. No entanto, para além da fiabilidade da rede de distribuição tendo em consideração as interrupções momentâneas, também se integrou neste problema de

minimização multiobjectivo as interrupções de longa duração. Para a implementação da otimização multiobjectivo utilizou-se a segunda variante do algoritmo memético. A abordagem proposta foi aplicada à rede de distribuição utilizada nos problemas anteriores. Também foram utilizadas ferramentas de apoio à tomada de decisão para este problema. Estas ferramentas foram baseadas nos métodos utilizados para os problemas anteriores.

## 6.2 CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS

A definição de contribuições originais é sempre uma tarefa difícil, apresentando um determinado grau de incerteza. No entanto, neste âmbito poderá destacar-se o seguinte trabalho realizado:

- ✓ Elaboração de modelos matemáticos associados aos índices de fiabilidade das redes de distribuição radiais e custos de equipamentos para a sua integração no problema de otimização multiobjectivo;
- ✓ Desenvolvimento e implementação de algoritmos multiobjectivo do tipo evolutivo para a resolução do problema da fiabilidade em redes de distribuição, tendo em consideração diversas funções objetivo contraditórias entre si;
- ✓ Elaboração de modelos matemáticos para a integração da geração distribuída no problema de otimização multiobjectivo da fiabilidade das redes de distribuição radiais. Estes modelos permitem a abordagem da maximização da geração distribuída sob um ponto de vista diferente do usual, nomeadamente no funcionamento sem ser em ilha.
- ✓ Proposta de duas abordagens para a minimização das diversas funções objetivo no problema da fiabilidade das redes de distribuição com incorporação da GD;
- ✓ Ao nível da integração da geração distribuída também foram propostos modelos matemáticos para avaliar e otimizar a minimização das emissões de gases de efeito de estufa, no contexto da fiabilidade das redes de distribuição radiais;
- ✓ Proposta de uma nova abordagem que considere a redução de interrupções momentâneas, nomeadamente através da utilização de sistemas de armazenamento. No âmbito desta proposta, desenvolveram-se modelos matemáticos para a sua integração no problema de otimização multiobjectivo.

Neste problema, para além da fiabilidade ao nível das interrupções momentâneas também se consideraram as interrupções de longa duração.

- ✓ Proposta de métodos de apoio à decisão para a escolha de uma solução, tendo em consideração todos os problemas multiobjectivo descritos neste trabalho;
- ✓ Implementação das abordagens propostas através de casos de estudo, onde é utilizada uma rede de distribuição radial real. Estudo dos resultados obtidos, através da análise das diversas soluções de carácter conflituoso, assim como, a comparação das abordagens e algoritmos de otimização propostas.

### 6.3 PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

Estabelecendo como ponto de partida todo o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação, é possível estabelecer um conjunto de direcções de investigação, visto que a mesma não esgota os assuntos nela abordada. Deste modo, são apresentadas abaixo algumas sugestões de desenvolvimento para futura investigação:

- Estudar a otimização deste problema através de novos algoritmos de otimização multiobjectivo;
- Desenvolver novos modelos com o objetivo de integrar nas várias abordagens propostas, índices de fiabilidade do ponto de vista do consumidor. Neste âmbito se propõe-se abordar este problema tendo em consideração os custos por cliente;
- Introdução de parâmetros de decisão como TIR (Taxa Interna de Rentabilidade), VAL (Valor Atual Líquido) e PRI (Período de Recuperação de Investimento), no sentido de efetuar análises à rentabilidade do investimento em equipamentos ao longo de determinado período de análise;
- Desenvolver abordagens similares para redes de distribuição do tipo em anel.







## Bibliografia

- [1] U. G. Knight, "The Logical design of electrical networks using linear programming methods," *Proceedings Inst. Elect. Eng.*, vol. 33, pp. 306-314, 1960.
- [2] S. K. Khator and C. LeungL, "Power distribution planning: a review of models and issues," *IEEE Trans. Power Systems*, Vols. Vol 12, No. 3, pp. 1151-1158, Aug. 1997.
- [3] T. Ackerman, G. Andersson and L. Soder, "Distributed generation: a definition," *Electric Power Systems Reseach*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [4] A. Alarcon-Rodrigues, G. Ault and S. Galloway, "Multi objective planning of distributed energy resources: a review of the state-of-the-art," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1353-1366, 2010.
- [5] U. S. D. o. Energy, "GRID 2030: a national vision for electricity's second 100 years," *Office of Electric Transmission and Distribution*, no. Washington DC, , April 2003.
- [6] C. o. U. S. -. 110th, "Smart Grid", Title XIII," *Energy Independence and Security Act of 2007*, no. Washington DC, , December 2007.
- [7] H. Farhangi, "The path to the smart grid," *IEEE Power and Energy Magazine*, 2010.
- [8] H. Brown, S. Suryanarayanan and G. T. Heydt, "Some characteristics of emerging distribution systems considering the smart grid initiative," *The Electricity Journal*, Vols. 23, Issue 5, 2010.
- [9] R. E. Brown, *Electric Power Distribution Reliability*, ISBN 9780849375675 - CAT# 7567: CRC Press, 2008.
- [10] B. R.E., G. S., C. R.D., V. S.S. and F. R., "Distribution System Reliability Assesment Using Hieracchical Markov Modelling," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vols. 11, n° 4, 1996.
- [11] I. P. E. Society, "IEEE Std. 1366:-2003 IEEE Guide for Electric Power Distrubtion Reliability Indices," *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc*, Vols. 35 (ISBN 0-7381-3890-8 SS95193), New York, 2004.
- [12] R. E. Brown, *Electric Power Distribution Reliability - Second Edition*, Boca Raton London New York: CRC Press , 2009.
- [13] I. IEEE, "Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices," *IEEE Standard 1366*, 2003.
- [14] R. Billinton and R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems," *Pitman Books, New York and London*, 1994.
- [15] V. Werner, D. Hall, R. Robinson and C. Warren, "Collecting and categorizing information related to electric power distribution interruption events: data consistency and categorization for benchmarking surveys," *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vols. 21, No 1.

- [16] L. B. N. Laboratory, "Estimated Value of Service Reliability for Electric Utility Customers in the United States," *Lawrence Berkeley National Laboratory*, vol. LBNL-2132E, June 2009.
- [17] G. Levitin, S. Mazal-Tov and D. Elmakis, "Genetic algorithm for optimal sectionalizing in radial distribution systems with alternative supply," *Electric Power Systems Research*, vol. 35, p. 149–155, 1995.
- [18] G. C. Barroso and R. P. S. Leao, "Switch placement algorithm for reducing customers outage impacts on radial distribution networks," *TENCON - IEEE Region 10 Conference*, 2012.
- [19] T. Niknam, "A new hybrid algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration," *Cybernetics and Systems, An Int. Journal*, vol. 40, pp. 508-527, 2009.
- [20] R. Billinton and S. Jonnavithula, "Optimal Switching device placement in radial distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11 (3), pp. 1646-1651, 1996.
- [21] F. Soudi and K. Tomsivic, "Optimized distribution protection using binary programming," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vols. 13, 1, pp. 218-224, 1998.
- [22] J. Teng and Y. Liu, "A novel ACS-Based Optimum Switch Relocation Method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, pp. 113 -120 , 2003.
- [23] C. Chen, C. Lin, H. Chuang, C. Li, M. Huang and C. Huang, "Optimal Placement of Line Switches for Distribution Automation Systems Using Immune Algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21 (3), August 2006.
- [24] K. Klinieam and S. Sirisumrannukul, "Optimal placement of sectionalizing switches in radial networks systems by a genetic algorithm," *International Conference on Sustainable Development: Challenges and Opportunities for GMS*, pp. 12-14, 2007.
- [25] A. Moradi and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal Switch Placement in Distribution Systems Using Trinary Particle Swarm Optimization Algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 271-279 , 2008.
- [26] L. G. W. Silva, R. A. F. Pereira and J. R. S. Mantovani, "Optimized Placement of Control and Protective Devices in Electric Distribution Systems Through Reactive Tabu Search Algorithm," *Electric Power System Research*, vol. 78, pp. 372-381 , 2008.
- [27] W. Tippachon and D. Rerkpreedapong, "Multiobjective Optimal Placement of Switches and Protective Devices in Electric Distribution Systems using Ant Colony Optimization," *Electric Power System Research*, vol. 79, pp. 1171-1178 , 2009.
- [28] M. Stojanovic, D. Tasić and A. Ristić, "A multiobjective approach to optimal allocation of distribution automation devices in radial medium voltage networks," *Automatic Control and Robotics*, Vols. 10, N° 2, pp. 167-180, 2010.
- [29] M. Lixin, L. Xinhui, W. Shouzheng and H. Miyajima, "Optimal switch placement in distribution networks under different conditions using improved GA," *Second International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing Proceedings (CINC)*, pp. 236-239, 2010.
- [30] T. Alencar, A. Rodrigues and M. Silva, "Switches Allocation in Distribution Network Using Particle Swarm Optimization Based on Fuzzy Expert Systems," *17th Power Systems Computation Conference*, pp. 22-26, 2011.
- [31] S. I. Goroohi, M. Banejad, R. Hooshmand and A. Dastfan, "Modified shuffled frog leaping algorithm for optimal switch placement in distribution automation system using a multi-objective fuzzy approach," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, p. 493—502, 2012.
- [32] D. O. Logrono, W. Wen-Fang and L. Yi-An, "Multi-Objective Optimal Placement of Automatic Line Switches," *Proceedings of the Institute of Industrial Engineers Asian Conference*, pp. 471-478, 2013.
- [33] A. Rajan and J. N. Rai, "Optimal switch placement in radial distribution systems using GA and PSO," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 5, Mar 2014.
- [34] S. Abdi, K. Afshar, S. Ahmadi, N. Bigdeli and M. Abdi, "Optimal recloser and auto sectionalizer allocation in distribution networks using IPSO – Monte Carlo approach," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 55, pp. 602-611, 2014.
- [35] T. K. S. D. L. A. Griffin T., "Placement of Dispersed Generations Systems for Reduced Losses," *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences.*, 2000.

- [36] Z. A. Hatziaargyriou N., "Wind power development in Europe," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89 (12), p. 1765–1782, 2001.
- [37] G. P. Harrison and A. R. Wallace, "Maximizing Distributed Generation Capacity in Deregulated Markets," *G. Harrison; R. Wallace IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exposition 2003*, vol. 2, pp. 527-530, 2003.
- [38] R. Wallace, "Hybrid Control of Distributed Generators Connected to Weak Rural Networks to Mitigate Voltage Variation," *IEE Colloquium on Protection and Connection of Renewable Energy Systems*, 1999.
- [39] P. S. Geogilakis and N. D. Hatziaargyriou, "Optimal distribution generation placement in power distribution networks: models, methods and future research," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vols. 28, N° 3, August 2013.
- [40] C. L. T. Borges and D. M. Falcão, "Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 28, pp. 413-420, 2006.
- [41] J. Antikainen, S. Repo, P. Verho and P. Jarventausta, "Possibilities to improve reliability of distribution network by intended island operation," *Energy Systems and Power*, Vols. 4, N° 1, 2009.
- [42] N. Khalesi, N. Rezai and M. R. Haghifam, "DG allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 33, pp. 288-295, 2011.
- [43] S. H. Mousavi and M. Mohammadi, "Optimal planning of distribution system in presence of DG with considering economic and reliability indices with fuzzy logic algorithm," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5(8), pp. 1248-1256, 2011.
- [44] S. Mohammadi and A. Samimi, "Optimal Placement of Distribution Generation Resources in Distribution Systems via Reliability Criterion," *Computing, Information Systems & Development Informatics*, Vols. 3, N° 4, 2012.
- [45] R. Arya, S. C. Choube and L. D. Arya, "Reliability evaluation and enhancement of distribution system in the presence of distributed generation based on standby mode," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 43, pp. 607-616, 2012.
- [46] S. Ganguly, N. C. Sahoo and D. Das, "Multi-objective particle swarm optimization based on fuzzy-Pareto-dominance for possibilistic planning of electrical distribution systems incorporating distributed generation," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 213, pp. 47-73, 2013.
- [47] R. M. Ciric and N. L. J. Rajakovic, "A new composite index of reliability of supply in the industrial systems with distributed generation," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 44, pp. 824-831, 2013.
- [48] A. Zidan, M. F. Shaaban and E.-S. E. F., "Long-term multiobjective distribution network planning by DG allocation and feeder's reconfiguration," *Electric Power Systems Research*, vol. 105, pp. 95-104, 2013.
- [49] M. B. Jorge, V. Héctor, L. G. Miguel and P. D. Héctor, "Multifault service restoration in distribution networks considering the operating mode of distribution generation," *Electric Power Systems Research*, vol. 116, pp. 67-76, 2014.
- [50] Z. N. Popovic, V. D. Kerleta and D. S. Popovic, "Hybrid simulated annealing and mixed integer linear programming algorithm for optimal planning of radial distribution networks with distributed generation," *Electric Power Systems Research*, vol. 108, pp. 211-222, 2014.
- [51] W. Sheng, K. Liu, X. Meng, X. Ye and Y. Liu, "Research and practice on typical modes and optimal allocation method for PV-Wind-ES in microgrid," *Electric Power Systems Research*, 2014.
- [52] A. Pregelj and M. Begovic, "Recloser allocation for improvement reliability of DG enhanced distribution networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vols. 21, N° 3, August 2006.
- [53] Z. Li, X. Yuqin and W. Zengping, "Research on optimization of recloser placement of DG enhanced distribution networks," *DRPT, 6-9 April, Nanjing*, 2008.
- [54] A. Vahidnia, G. Ledwich, A. Ghosh and E. Palmer, "An improved genetic algorithm and graph theory based method for optimal sectionalizer switch placement in distribution networks with DG," *Proceedings of AUPEC/IEEE*, no. Integrating Renewables into the Grid, 2011.

- [55] S. A. M. Javadian and M. R. Haghifam, "Optimal placement of protective devices in distribution networks based on risk analysis," *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, IEEE/PES*, 2010.
- [56] E. Jalilzadeh, S. M. Miri-Larimi and M. R. Haghifam, "Optimal placement of sectionalizing switches in distribution network with presence of renewable energy resources," *CIGRE Workshop, Lisbon*, May 2012.
- [57] G. Balakrishna and C. S. Babu, "Optimal placement of switches in DG equipped distribution systems by particle swarm optimization," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vols. 2, Issue 12, pp. 6234-6240, 2013.
- [58] R. Dugan and T. McDermott, "Distributed generation," *IEEE Industry Application Magazine*, vol. 8, pp. 19-25, 2002.
- [59] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen and G. Strbac, *Embedded Generation*, London: IEE Publisher, 2000.
- [60] H. Willis and W. Scott, *Distributed Power Generation*, New York: Marcel Dekker, 2000.
- [61] J. McDowall, "Opportunities for electricity storage in distribution generation and renewables," *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2001.
- [62] J. Baker, "Electrical energy storage challenges and new market opportunities," *Energy World*, vol. 324, pp. 10-12, 2004.
- [63] M. Kleimer, U. Buenger, F. Crotogino, C. Gatzert, W. Glaunsinger and e. al., "Energy Storage for Improved Operation of Future Energy Supply Systems," *CIGRE - International Council on Large Electric Systems*, 2008.
- [64] G. B. A. C. J. G. Ferreira, "Optimal distribution protection design considering momentary and sustained reliability indices," *Modern Electric Power Systems, Proceedings of the International Symposium*, p. pp. 1 – 8, 2010.
- [65] A. A. A. Esteban, "Optimal selection and allocation of sectionalizers in distribution systems using fuzzy dynamic programming," *Energy and Power Engineering*, vol. 2, p. pp. 283 – 290, 2010.
- [66] K. C. Y. K. E. Ntetreba, "Application of artificial bee colony algorithm for optimal distribution protection design," *Recent Researches in Environmental and Geological Science, Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Energy*, p. pp. 151 – 156, 2012.
- [67] N. M. A. S. H. Salman, "Reliability improvement in distribution systems by optimal placement of DSTATCOM using binary gravitational search algorithm," *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review)*, vol. 2, p. pp. 295 – 299, 2012.
- [68] I. P. R. M. R. Wasiak, "Energy storage application in low-voltage microgrids for energy management and power quality improvement," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, Vols. 8, (3), pp. pp. 463-472, 2014.
- [69] EU, "The future role of challenges for energy storage," Directorate-General for Energy - European Commission, 2014.
- [70] U. D. o. Energy, "Grid and Energy Storage," U.S. Department of Energy, 2013.
- [71] P. Denholm, E. Ela, B. Kirby and M. Milligan, "The role of energy storage with renewable electric generation," NREL - National Renewable Energy Laboratory, 2010.
- [72] M. Cepin, "Assessment of Power System Reliability Methods and Applications," *Springer*, 2011.
- [73] G. Levitin, S. Mazal-Tov and D. Elmakis, "Genetic Algorithm for optimal sectionalizing in radial distribution systems with alternative supply," *Elsevier Electric Power Systems Research*, Vols. vol. 35, issue 3, pp. 149-155, Dec. 1995.
- [74] A. Kavousi-Fard and M. R. Akbari-Zadeh, "Reliability enhancement using optimal distribution feeder reconfiguration," *Neurocomputing*, vol. 106, pp. 1-11, 2013.
- [75] R. M. Vitorino, H. M. Jorge and L. P. Neves, "Loss and Reliability optimization for power distribution system operation," *Electric Power Systems Research*, vol. 96, pp. 177-184, 2013.
- [76] A. V. Pombo, J. Murta-Pina and V. F. Pires, "Application of NSGA-II algorithm to multiobjective optimization of switching devices placement in electric power distribution systems," in *5th IFIP WG 5.5/SOCOLNET Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, DoCEIS 2014*, Costa da Caparica, Portugal, April 7-9, 2014, Springer, 2014, pp. 380-387.

- [77] A. V. Pombo, J. Murta-Pina and V. F. Pires, "Multiobjective planning of distribution networks incorporating switches and protective devices using a memetic optimization," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 136, pp. 101-108, 2015.
- [78] H. L. Willis, H. Tram, M. V. Engel and L. Finley, "Optimization applications to power distribution," *IEEE Comput. Appl. Power*, Vols. Vol. 8, No. 4, pp. 12-17, Oct. 1995.
- [79] A. Konac, D. W. Coit and A. E. Smith, "Multiobjective Optimization using genetic algorithms: a tutorial," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 91, pp. 992-1007, 2006.
- [80] K. A. De Jong, *Evolutionary computation: A unified approach.*, Cambridge: MA: MIT, 2006.
- [81] T. Back, U. Hammel and H. Schwefel, "Evolutionary computation: Comments on the history and current state," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1(1), pp. 3-17, 1997.
- [82] E. Zitzler, M. Laumanns and S. Bleuler, "A tutorial on evolutionary multiobjective optimization," *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol. 535, pp. 3-37, 2004.
- [83] E. Zitzler, K. Deb and L. Thiele, "Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results. Technical report 70,," Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, 2000.
- [84] B. Silverman, *Density estimation for statistics and data analysis.*, London: Chapman and Hall, 1986.
- [85] J. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [86] H. Tamaki, H. Kita and S. Kobayashi, "Multiobjective optimization by genetic algorithms: A review," *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 517-522, 1996.
- [87] K. Deb, "Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms," *John Wiley and Sons Ltd: Reprinted copy*, October 2004.
- [88] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. (6) 2, pp. 182 - 197, 2002.
- [89] D. Goldberg and J. Richardson, *Genetic algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [90] K. DEB, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6 (2), pp. 182-197, 2002.
- [91] K. A. DeJong, "A analysis of the behavior of a class of genetic adaptive," University of Michigan, 1975.
- [92] P. Moscato, "On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms," *Caltech concurrent computation program*, vol. C3P Report 826, 1989.
- [93] H. Ishibuchi, Y. Tanigaki, N. Akedo and Y. Nojima, "Balance between genetic search and local search in memetic algorithms for multiobjective permutation flowshop scheduling," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, Vols. 7, n° 2, pp. 204-223, 2002.
- [94] H. Ishibuchi and T. Murata, "Multiobjective genetic local search algorithm," in *3rd IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Nagoya, Japan, May 20-22, 1996.
- [95] R. I.J.R. and N. J.A.D., "Possibilistic model based on fuzzy sets for the multiobjective optimal planning of electric power distribution networks," *IEEE Trans. Power Systems*, Vols. 19, N° 4, pp. 1801-1810, 2004.
- [96] O. Siirto, M. Hyvarinen, M. Loukkalahti and A. Hamalainen, "Improving reliability in an urban network," *Electric Power Systems Research*, 2014.
- [97] H. Zheng, Y. Cheng, D. Gou, A. Bern and W. E. Muston, "Impact of automatic switches on power distribution system reliability," *Electric Power Systems Research*, vol. 83, pp. 51-57, 2012.
- [98] A. V. Pombo, J. Murta-Pina and V. F. Pires, "A Multiobjective Placement of Switching Devices in Distribution Networks Incorporating Distributed Energy Resources," *Electric Power Systems Research*, p. DOI: 10.1016/j.eprsr.2015.08.012, 2015.

- [99] M. Akorede, H. Hizam and E. Pouresmaeil, "Distributed energy resources and benefits to the environment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 724-734, 2014.
- [100] A. V. Pombo, J. Murta-Pina and V. F. Pires, "Multiobjective Switching Devices Placement Considering Environmental Constraints in Distribution Networks with Distributed Energy Resources," in *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp 2789 - 2793, March 17-19th, Seville, Spain, 2015.
- [101] A. V. Pombo, J. Murta-Pina and V. F. Pires, "Distributed Energy Resources and environmental optimization using a memetic algorithm," in *9th International Conference on Compatibility and Power Electronics*, Caparica, Lisbon, Portugal, 2015.
- [102] M. Mohammadi, "Voltage dip rating reduction based optimal location of DVR for reliability improvement of electrical distribution system," *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, vol. 4 (11), p. pp. 3493 – 3500, 2013.
- [103] M. Mohammadi, "GA based reliability enhancement in distribution systems through sagged bus numbers reduction by optimal placement of unified series shunt compensator," *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, vol. 5 (2), pp. pp. 39-47, 2013.
- [104] F. H. Z. S. Y. Zhang, "Mixed integer linear model for transmission expansion planning with line losses and energy storage systems," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, Vols. 7, (8), pp. pp. 919-928, 2013.
- [105] S. S. T. T. H. S. A. F. T. Chakraborty, "Determination methodology for optimizing the energy storage size power system," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, Vols. 3, (11), pp. pp. 987-999, 2009.
- [106] J. C. C. M. I. Teng, "Utilizing energy storage systems to mitigate power system vulnerability," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, Vols. 7, (7), pp. pp. 790-798, 2013.
- [107] E. A. f. S. o. Energy, "National regulation related to energy storage," EUROPEAN COMMISSION,, Brussels, 2013.
- [108] Ecofys West Coast Perspective White Paper, "Energy Storage Opportunities and Challenges," ECOFYS, 2014.



## ANEXO

Dados da rede de distribuição utilizada no caso de estudo (Figura 7-1)

Nó	Nº Clientes	Secção	Comprimento [km]	Frequência Interrupção	Tempo interrupção médio com seccionador no nó [min]	Tempo interrupção médio com disjuntor no nó [min]
1	0	0-1	0,05	0,02	2,05	1,5
2	68	1-2	0,035	0,014	1,435	1,05
3	89	2-3	0,089	0,0356	3,649	2,67
4	9	3-4	0,105	0,042	4,305	3,15
5	24	4-5	0,13	0,052	5,33	3,9
6	24	5-6	0,07	0,028	2,87	2,1
7	5	6-7	0,04	0,016	1,64	1,2
8	22	7-8	0,14	0,056	5,74	4,2
9	60	8-9	0,12	0,048	4,92	3,6
10	10	9-10	0,15	0,06	6,15	4,5
11	19	10-11	0,06	0,024	2,46	1,8
12	13	11-12	0,07	0,028	2,87	2,1
13	8	12-13	0,03	0,012	1,23	0,9
14	10	13-14	0,07	0,028	2,87	2,1
15	5	14-15	0,04	0,016	1,64	1,2
16	27	15-16	0,09	0,036	3,69	2,7
17	15	16-17	0,06	0,024	2,46	1,8
18	11	17-18	0,17	0,068	6,97	5,1
19	9	18-19	0,34	0,136	13,94	10,2
20	15	19-20	0,07	0,028	2,87	2,1
21	15	20-21	0,06	0,024	2,46	1,8
22	8	21-22	0,05	0,02	2,05	1,5
23	17	22-23	0,41	0,164	16,81	12,3
24	30	23-24	0,15	0,06	6,15	4,5

25	26	24-25	0,05	0,02	2,05	1,5
26	23	25-26	0,02	0,008	0,82	0,6
27	13	26-27	0,2	0,08	8,2	6
28	10	27-28	0,02	0,008	0,82	0,6
29	12	28-29	0,09	0,036	3,69	2,7
30	11	29-30	0,07	0,028	2,87	2,1
31	13	30-31	0,11	0,044	4,51	3,3
32	7	31-32	0,13	0,052	5,33	3,9
33	8	32-33	0,08	0,032	3,28	2,4
34	15	5-34	0,1	0,04	4,1	3
35	12	5-35	0,08	0,032	3,28	2,4
36	57	35-36	0,05	0,02	2,05	1,5
37	17	36-37	0,05	0,02	2,05	1,5
38	54	6-38	0,02	0,008	0,82	0,6
39	58	6-39	0,02	0,008	0,82	0,6
40	7	39-40	0,14	0,056	5,74	4,2
41	27	40-41	0,06	0,024	2,46	1,8
42	15	41-42	0,07	0,028	2,87	2,1
43	17	8-43	0,09	0,036	3,69	2,7
44	6	43-44	0,03	0,012	1,23	0,9
45	8	44-45	0,07	0,028	2,87	2,1
46	12	9-46	0,12	0,048	4,92	3,6
47	18	10-47	0,13	0,052	5,33	3,9
48	8	47-48	0,16	0,064	6,56	4,8
49	17	48-49	0,09	0,036	3,69	2,7
50	8	49-50	0,09	0,036	3,69	2,7
51	17	50-51	0,15	0,06	6,15	4,5
52	12	10-52	0,02	0,008	0,82	0,6
53	21	52-53	0,12	0,048	4,92	3,6
54	14	53-54	0,1	0,04	4,1	3
55	17	54-55	0,05	0,02	2,05	1,5
56	28	55-56	0,03	0,012	1,23	0,9
57	25	56-57	0,05	0,02	2,05	1,5
58	10	57-58	0,07	0,028	2,87	2,1
59	7	58-59	0,04	0,016	1,64	1,2
60	14	59-60	0,1	0,04	4,1	3
61	20	60-61	0,19	0,076	7,79	5,7
62	24	61-62	0,09	0,036	3,69	2,7
63	23	62-63	0,12	0,048	4,92	3,6
64	25	63-64	0,2	0,08	8,2	6
65	17	64-65	0,09	0,036	3,69	2,7
66	3	65-66	0,08	0,032	3,28	2,4
67	6	11-67	0,02	0,008	0,82	0,6
68	21	67-68	0,16	0,064	6,56	4,8
69	15	11-69	0,17	0,068	6,97	5,1



70	34	13-70	0,1	0,04	4,1	3
71	20	70-71	0,09	0,036	3,69	2,7
72	27	15-72	0,1	0,04	4,1	3
73	23	72-73	0,1	0,04	4,1	3
74	8	16-74	0,02	0,008	0,82	0,6
75	14	18-75	0,1	0,04	4,1	3
76	8	19-76	0,06	0,024	2,46	1,8
77	25	19-77	0,09	0,036	3,69	2,7
78	107	77-78	0,11	0,044	4,51	3,3
79	27	78-79	0,02	0,008	0,82	0,6
80	28	79-80	0,04	0,016	1,64	1,2
81	25	80-81	0,02	0,008	0,82	0,6
82	17	81-82	0,06	0,024	2,46	1,8
83	16	21-83	0,21	0,084	8,61	6,3
84	17	83-84	0,09	0,036	3,69	2,7
85	6	84-85	0,11	0,044	4,51	3,3
86	9	85-86	0,06	0,024	2,46	1,8
87	10	22-87	0,08	0,032	3,28	2,4
88	23	24-88	0,1	0,04	4,1	3
89	6	25-89	0,22	0,088	9,02	6,6
90	33	24-90	0,06	0,024	2,46	1,8
91	5	90-91	0,15	0,06	6,15	4,5
92	1	91-92	0,1	0,04	4,1	3
93	7	27-93	0,09	0,036	3,69	2,7
94	11	28-94	0,05	0,02	2,05	1,5